



*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.*
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Cátedra Juan José Arenas: Modelo paramétrico y análisis estructural comparativo del Puente Arco de “La Barqueta”, Sevilla

Trabajo realizado por:
Efrén Miguel Calleja López

Dirigido:
Guillermo Capellán Miguel
Santiago Guerra Soto

Titulación:
**Máster Universitario en
Ingeniería de Caminos, Canales y
Puertos**

Santander, Junio de 2020

TRABAJO FIN DE MASTER

AGRADECIMIENTOS

A la cátedra Juan José Arenas, por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo de fin de máster.

A Guillermo Capellán Miguel, Santiago Guerra Soto y Nicolás Emaldi Algarate, por su apoyo y dedicación durante todo este curso.

A mis padres, quienes siempre me han apoyado para que pueda cumplir mis metas.

A Marta, quien un día cualquiera me animó a escoger este proyecto. Quien otro día cualquiera me ayudó a visualizar las secciones. Quien todos los días cree en mí.

A M^a Paz y Jose Antonio, quienes siempre han compartido mis alegrías.

CONTENIDO

Lista de figuras

Lista de tablas

Resumen

Abstract

Motivación y objetivos

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO | 1 |
| 1.1. METODOLOGÍA BIM. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.2. MODELO PARAMÉTRICO. RHINOCEROS. GRASSHOPPER | 2 |
| 1.3. BASES DEL MODELO DE CÁLCULO. KARAMBA 3D | 2 |
| 1.4. ANÁLISIS NUMÉRICO. CÁLCULO ESTRUCTURAL. SAP 2000 | 3 |
| CAPÍTULO 2. CASO DE ESTUDIO | 4 |
| 2.1. LA BARQUETA. PUENTE ARCO INFERIOR | 4 |
| 2.2. INTERPRETACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO. MODELO CAD 3D | 6 |
| CAPÍTULO 3. MODELO PARÁMETRICO DEL CASO DE ESTUDIO | 15 |
| CAPÍTULO 4. MODELO DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO | 42 |
| CAPÍTULO 5. CÁLCULO ESTRUCTURAL DEL CASO DE ESTUDIO | 52 |
| CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CASO DE ESTUDIO | 64 |
| 6.1. DEFINICIÓN DE LA ENVOLVENTE DE LOS NÚCLEOS CENTRALES DE LAS SECCIONES QUE CONFIGURAN EL ARCO | 65 |
| 6.2. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA DIRECTRÍZ DEL ARCO. SECCIÓN DE TABLERO Y SECCIONES DEL ARCO DETERMINADAS | 67 |
| 6.2.1. ANÁLISIS CONSIDERANDO EXTREMOS DEL ARCO FIJOS | 67 |
| 6.2.1.1. DIRECTRÍZ 1. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA PARA LA DIRECTRÍZ INICIAL DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO | 67 |
| 6.2.1.2. DIRECTRÍZ 2. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA DE LA DIRECTRÍZ 1 DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO | 68 |

| | |
|--|----|
| 6.2.1.3. DIRECTRÍZ 3. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA DE LA DIRECTRÍZ 2 DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO | 71 |
| 6.2.1.4. DIRECTRÍZ 4. AJUSTE ENTRE LA DIRECTRÍZ INICIAL Y LA LÍNEA DE PRESIONES ASOCIADA A LA MISMA DEL CASO DE ESTUDIO | 73 |
| 6.2.2. ANÁLISIS CONSIDERANDO EXTREMOS DEL ARCO MÓVILES. VARIACIÓN DE LA POSICIÓN DEL NUDO RÍGIDO DE UNIÓN ENTRE LOS PIES INCLINADOS Y EL ARCO CON RESPECTO DE LA CONFIGURACIÓN INICIAL | 76 |
| 6.2.2.1. DIRECTRÍZ 2. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA DE LA DIRECTRÍZ 1 DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO | 76 |
| 6.2.2.2. DIRECTRÍZ 3. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA DE LA DIRECTRÍZ 2 DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO | 78 |
| 6.3. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS SECCIONES DEL ARCO. SECCIÓN DE TABLERO Y DIRECTRÍZ DETERMINADAS | 80 |
| 6.3.1. SECCIÓN ARCO 1. CANTO: 2,7 m, Ancho: 2,7 m | 82 |
| 6.3.2. SECCIÓN ARCO 2. CANTO: 3 m, Ancho: 2,7 m | 84 |
| 6.3.3. SECCIÓN ARCO 3. CANTO: 3 m, Ancho: 3,5 m | 86 |
| 6.3.4. SECCIÓN ARCO 4. CANTO: 2 m, Ancho: 3 m | 88 |

Conclusiones

Referencias

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento estructural de los elementos del puente arco inferior frente al puente arco superior (Arenas & Asociados, 2020).

Figura 2. Puente de la Barqueta. Lado Cartuja. (Arenas & Asociados, 2020)

Figura 3. Puente de la Barqueta. Alzado. (Arenas & Asociados, 2020).

Figura 4. Modelo 3D del caso de estudio.

Figura 5. Modelo 3D. Estribo del puente de la Barqueta. Lado Cartuja.

Figura 6. Modelo 3D. Detalle Estribo y cimentación del puente de la Barqueta. Lado Cartuja.

Figura 7. Modelo 3D. Apoyos del puente de La Barqueta y cimentación de los mismos. Aparatos de apoyo.

Figura 8. Modelo 3D. Pasarelas laterales del puente de La Barqueta. Detalle rigidizadores y secciones por diagrama.

Figura 9. Modelo 3D. Traviesa de apoyo del puente de La Barqueta y cimentación de los mismos. Detalle rigidizadores y secciones por diagrama.

Figura 10. Modelo 3D. Tornapuntas del puente de La Barqueta. Detalle del plano de corte a soldar con el tablero.

Figura 11. Modelo 3D. Secciones por marco pies inclinados de La Barqueta.

Figura 12. Modelo 3D. Pies inclinados de La Barqueta.

Figura 13. Modelo 3D. Tablero de La Barqueta.

Figura 14. Modelo 3D. Secciones por diafragma Tablero de La Barqueta. Detalle de rigidizadores.

Figura 15. Modelo 3D. Arco de la Barqueta.

Figura 16. Modelo 3D. Enlace arco y péndolas de la Barqueta. Detalle de rehundido.

Figura 17. Modelo 3D. Nudos rígidos de la Barqueta. Elemento de unión entre pies inclinados y arco.

Figura 18. Modelización paramétrica. Esquema final general para la generación del modelo paramétrico de la Barqueta resultante.

Figura 19. Modelización paramétrica. Modelo paramétrico de la Barqueta resultante.

Figura 20. Modelización paramétrica. Detalle de la modelización del tablero.

Figura 21. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de las secciones del tablero.

Figura 22. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de las secciones del tablero.

Figura 23. Modelización paramétrica. Configuración inicial de la sección del tablero del caso de estudio.

Figura 24. Modelización paramétrica. Variación de la directriz, canto, ancho y pendiente transversal de la configuración inicial de la sección del tablero del caso de estudio, mediante los bloques de código descritos con anterioridad.

Figura 25. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de los rigidizadores que constituyen el tablero.

Figura 26. Modelización paramétrica. Definición de la geometría de los rigidizadores.

Figura 27. Modelización paramétrica. Variación del radio de curvatura de los rigidizadores a definir por el usuario.

Figura 28. Modelización paramétrica. Programación del número de rigidizadores de la parte inclinada de la chapa superior de la sección del tablero.

Figura 29. Modelización paramétrica. Modelización del número de rigidizadores para la configuración geométrica inicial del caso de estudio.

Figura 30. Modelización paramétrica. Generación automática del número de rigidizadores según una nueva geometría del caso de estudio.

Figura 31. Modelización paramétrica. Definición de la directriz del arco caso de estudio a partir de las coordenadas de los planos de proyecto.

Figura 32. Modelización paramétrica. Obtención de la curva de mejor ajuste del caso de estudio a partir de las coordenadas de los planos de proyecto.

Figura 33. Modelización paramétrica. Parametrización y modelización de la directriz del arco del caso de estudio a partir de la curva de mejor ajuste.

Figura 34. Modelización paramétrica. Directriz resultante tras la modelización del caso de estudio.

Figura 35. Modelización paramétrica. Casuística de posibles directrices del arco del caso de estudio tras la parametrización.

Figura 36. Modelización paramétrica. Evaluación de los distintos puntos de la directriz curva que conformarán los límites de generación de las secciones transversales del arco.

Figura 37. Modelización paramétrica. Determinación de las subcurvas en las que se extenderán las diversas secciones. Definición de dominios.

Figura 38. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de las secciones tipo que constituyen el arco.

Figura 39. Modelización paramétrica. Definición de la sección inicial que configura el arco.

Figura 40. Modelización paramétrica. Orientación de las secciones en puntos infinitamente próximos perpendicularmente a las subcurvas definidas.

Figura 41. Modelización paramétrica. Modelización del arco del caso de estudio. Alzado.

Figura 42. Modelización paramétrica. Modelización del arco del caso de estudio.

Figura 43. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de la traviesa de apoyo del caso de estudio.

Figura 44. Modelización paramétrica. Sentencias condicionales a imponer en la traviesa de apoyo con respecto y las pasarelas laterales.

Figura 45. Modelización paramétrica. Modelización de la traviesa de apoyo del caso de estudio.

Figura 46. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de las tornapuntas del caso de estudio.

Figura 47. Modelización paramétrica. Generación de las secciones transversales que compondrán las tornapuntas.

Figura 48. Modelización paramétrica. Generación del sólido que compondrá las tornapuntas.

Figura 49. Modelización paramétrica. Modelización de las tornapuntas del caso de estudio.

Figura 50. Modelización paramétrica. Detalle general del nudo de arranque de los pies inclinados.

Figura 51. Modelización paramétrica. Definición del nudo de arranque de los pies inclinados.

Figura 52. Modelización paramétrica. Modelización del nudo de arranque de los pies inclinados de la situación de estudio.

Figura 53. Modelización paramétrica. Detalle general de los pies inclinados.

Figura 54. Modelización paramétrica. Representación de la sección tipo 2 y de las secciones abiertas alojadas en el nudo de arranque de los pies inclinados.

Figura 55. Modelización paramétrica. Representación de la parte intermedia y de la parte final de los pies inclinados.

Figura 56. Modelización paramétrica. Representación de secciones de transición entre las secciones tipo. Constitución de surcos.

Figura 57. Modelización paramétrica. Modelización de los pies inclinados del caso de estudio. Detalle de los surcos profundos tanto en el inicio, como en el fin de los pies inclinados.

Figura 58. Modelización paramétrica. Generación del sólido que conformará el nudo de enlace entre los pies inclinados y el arco.

Figura 59. Modelización paramétrica. Nudo de enlace entre pies inclinados y arco de la situación de estudio.

Figura 60. Modelización paramétrica. Detalle general de los apoyos verticales y los aparatos de apoyo de la situación de estudio.

Figura 61. Modelización paramétrica. Modelización de los apoyos verticales y los aparatos de apoyo de la situación de estudio.

Figura 62. Modelización paramétrica. Detalle de la parametrización de las péndolas.

Figura 63. Modelización paramétrica. Modelización de las péndolas del caso de estudio.

Figura 64. Modelización paramétrica. Variación de las péndolas modelizadas en la situación inicial. 32 péndolas.

Figura 65. Modelo de cálculo resultante mediante Karamba 3D.

Figura 66. Modelo de cálculo resultante mediante Karamba 3D. Alzado.

Figura 67. Modelo de cálculo programado mediante Karamba 3D.

Figura 68. Elementos que configuran el arco del modelo de cálculo.

Figura 69. Conversión de los elementos que forman la directriz del arco en vigas.

Figura 70. Elementos que configuran el tablero del modelo de cálculo.

Figura 71. Conversión de los elementos que forman la directriz del arco en vigas.

Figura 72. Elementos que configuran las péndolas en el modelo de cálculo.

Figura 73. Conversión de los elementos que forman las péndolas del arco en vigas, anulando previamente la rigidez a flexión.

Figura 74. Elementos que configuran los pies inclinados en el modelo de cálculo.

Figura 75. Conversión de los elementos que forman los pies inclinados del puente en vigas.

Figura 76. Elementos que configuran las tornapuntas en el modelo de cálculo.

Figura 77. Conversión de los elementos que forman las tornapuntas del puente en vigas.

Figura 78. Elementos que configuran las traviesas de apoyo en el modelo de cálculo.

Figura 79. Conversión de los elementos que forman las traviesas de apoyo del puente en vigas.

Figura 80. Esquema de las condiciones de apoyo impuestas.

Figura 81. Definición de los apoyos, conforme al esquema dispuesto, del modelo de cálculo.

Figura 82. Intercambio y transferencia del modelo generado mediante Karamba 3D a SAP2000.

Figura 83. Modelo de cálculo de la situación de estudio realizado mediante Karamba 3D e importado en SAP2000.

Figura 84. Sección tipo arco 1. Cotas en metros.

Figura 85. Sección tipo arco 3. Cotas en metros.

Figura 86. Sección tipo arco 5. Cotas en metros.

Figura 87. Sección tipo tablero. Cotas en metros.

Figura 88. Sección tipo pasarelas laterales. Cotas en metros.

Figura 89. Sección inicial de las tornapuntas. Cotas en metros.

Figura 90. Sección tipo 1 en tornapuntas. Cotas en metros.

Figura 91. Sección tipo 2 en tornapuntas. Cotas en metros.

Figura 92. Sección tipo pies inclinados. Cotas en metros.

Figura 93. Sección final pies inclinados. Cotas en metros.

Figura 94. Sección traviesa de apoyo simplificada. Cotas en metros.

Figura 95. Sección en nudo de arranque simplificada. Cotas en metros.

Figura 96. Sección en péndolas. Cotas en metros.

Figura 97. Identificación de los elementos del modelo de cálculo Karamba 3D en SAP 2000.

Figura 98. Ley de axiles, asociada a la combinación frecuente recogida en la IAP-11.

Figura 99. Ley de momentos flectores, asociada a la combinación frecuente recogida en la IAP-11.

Figura 100. Determinación del núcleo central de la sección inicial del arco.

Figura 101. Modelización del núcleo central de la sección inicial del arco.

Figura 102. Envolvente de los Núcleos centrales de las secciones del arco.

Figura 103. Detalle de la envolvente de los Núcleos centrales de las secciones del arco.

Figura 104. Representación de la línea de presiones asociada a la situación de cálculo inicial.

Figura 105. Nuevo modelo de cálculo que emplea como directriz 2 la línea de presiones obtenida para la directriz 1.

Figura 106. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 2 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 107. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 2 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 108. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 2.

Figura 109. Nuevo modelo de cálculo que emplea como directriz 3 la línea de presiones obtenida para la directriz 2.

Figura 110. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 3 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 111. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 3 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 112. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 3.

Figura 113. Directriz 4. Directriz de ajuste entre la directriz inicial y su línea de presiones correspondiente.

Figura 114. Modelo de cálculo generado asociado a la directriz 4.

Figura 115. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 4 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 116. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 4 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 117. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 4.

Figura 118. Modelo de cálculo generado asociado a la directriz 2. Adaptación de los nudos de enlace a dicha directriz.

Figura 119. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 2 como directriz del arco. Variación nudo. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 120. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 2 como directriz del arco. Variación nudo. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 121. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 2. Variación de la posición del nudo.

Figura 122. Modelo de cálculo generado asociado a la directriz 3. Adaptación de los nudos de enlace a dicha directriz.

Figura 123. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 3 como directriz del arco. Variación nudo. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 124. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 3 como directriz del arco. Variación nudo. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 125. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 3. Variación de la posición del nudo.

Figura 126. Sección Tipo arco 1. Ancho y canto variables según cada caso de estudio.

Figura 127. Sección Tipo arco 3. Ancho y canto variables según cada caso de estudio.

Figura 128. Sección Tipo arco 5. Ancho y canto variables según cada caso de estudio.

Figura 129. Esfuerzos axiles obtenidos para secciones del arco con Canto= 2,7 m y Ancho= 2,7m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 130. Momentos flectores obtenidos para secciones del arco con Canto= 2,7 m y Ancho= 2,7m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 131. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 1. secciones del arco con Canto=2,7 m y Ancho= 2,7m.

Figura 132. Esfuerzos axiles obtenidos para secciones del arco con Canto= 3 m y Ancho= 2,7m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 133. Momentos flectores obtenidos para secciones del arco con Canto= 3 m y Ancho= 2,7m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 134. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 1. secciones del arco con Canto=3 m y Ancho= 2,7m.

Figura 135. Esfuerzos axiles obtenidos para secciones del arco con Canto= 3 m y Ancho= 3,5 m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 136. Momentos flectores obtenidos para secciones del arco con Canto= 3 m y Ancho= 3,5 m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 137. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 1. secciones del arco con Canto=3 m y Ancho= 3,5 m.

Figura 138. Esfuerzos axiles obtenidos para secciones del arco con Canto= 2 m y Ancho= 3 m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 139. Momentos flectores obtenidos para secciones del arco con Canto= 2 m y Ancho= 3 m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Figura 140. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 1. secciones del arco con Canto=2 m y Ancho= 3 m.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de los puntos que configuran la directriz del arco.

Tabla 2. Definición de cada elemento en el modelo estructural. Secciones transversales y materiales que los constituyen.

Tabla 3. Resultados del cálculo estructural de la situación de estudio para la combinación frecuente la normativa IAP-11.

Tabla 4. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz inicial obtenida para la situación de estudio.

Tabla 5. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 2 obtenida para la situación de análisis.

Tabla 6. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 3 obtenida para la situación de análisis.

Tabla 7. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 4 obtenida para la situación de análisis.

Tabla 8. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 4 obtenida para la situación de análisis.

Tabla 9. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 4 obtenida para la situación de análisis.

Tabla 10. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco para secciones del arco con Canto=2,7 m y Ancho= 2,7m. Excentricidad respecto de la directriz 1 obtenida para la situación de análisis.

Tabla 11. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco para secciones del arco con Canto=3 m y Ancho= 2,7m. Excentricidad respecto de la directriz 1 obtenida para la situación de análisis.

Tabla 12. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco para secciones del arco con Canto=3 m y Ancho= 3,5 m. Excentricidad respecto de la directriz 1 obtenida para la situación de análisis.

Tabla 13. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco para secciones del arco con Canto=2 m y Ancho= 3 m. Excentricidad respecto de la directriz 1 obtenida para la situación de análisis.

RESUMEN

Título del TFM: Proyecto Cátedra Juan José Arenas: Modelo paramétrico y análisis estructural comparativo del Puente Arco de “La Barqueta”, Sevilla.

Autor: Efrén Miguel Calleja López

Director: Guillermo Capellán Miguel

Santiago Guerra Soto

Convocatoria: Junio 2020

Palabras clave: Puente arco, línea de presiones, antifunicularidad, núcleo central, momento flector, esfuerzo axil, modelo de cálculo, modelo paramétrico, programación visual, Grasshopper, Karamba 3D, SAP 2000, IAP-11,

Planteamiento del problema: El siguiente trabajo fin de máster tiene como finalidad analizar y estudiar el comportamiento de los puentes arco; en concreto, de los puentes arco con tablero inferior. El objetivo consiste en realizar un análisis estructural comparativo de las distintas configuraciones que se pueden establecer en los mismos, tanto en sus directrices, como en sus secciones transversales. Por otro lado, otro de los objetivos principales de este trabajo de fin de máster consiste en realizar un modelo paramétrico completo y compacto del puente del cual es objeto este análisis.

Soluciones adoptadas: En primer lugar, se desarrollará un modelo tridimensional del puente de La Barqueta; este modelo, será llevado a cabo mediante una metodología de diseño convencional, tal y como es AutoCAD 3D. Frente a las limitaciones que esta metodología supone, posteriormente, se desarrollará un modelo paramétrico, en el cual todos los elementos estarán interconectados entre sí, siendo el mismo, completamente variable, adaptándose a cualquier situación que el usuario desee. Para ello, se empleará programación visual a partir de Grasshopper. Una vez realizado un modelo paramétrico sólido y compacto, se establecerá un modelo base cálculo; dicho modelo tendrá la particularidad de estar conectado con el modelo paramétrico, de tal forma que sea posible analizar y generar, infinitos modelos de cálculo, ya que los cuales, suponen las infinitas combinaciones del modelo paramétrico. Dicho modelo de cálculo será llevado a cabo mediante Karamba 3D. Teniendo en cuenta que, en Karamba 3D no es posible definir secciones transversales complejas, es necesario realizar el cálculo estructural mediante SAP2000. Por otro lado, el análisis estructural parte de definir, en el modelo paramétrico, el núcleo central de cada una de las secciones del arco; de esta forma, por extensión de las mismas, se generará la envolvente de los núcleos centrales de las secciones del arco. Una vez definida dicha envolvente, se procederá al proceso de carga la estructura, y a partir de los resultados obtenidos, se determinará la línea de presiones del arco. El objetivo consiste en buscar una combinación de la directriz y de las secciones del arco para las cuales, la línea de presiones asociada, se

encuentre siempre dentro de la envolvente de los núcleos centrales generada, de tal forma que el arco siempre esté comprimido.

Conclusiones: Los puentes arco con inferior tablero constituyen una solución en la que todo el arco se encuentra situado por encima del tablero; dicho tablero, se encuentra completamente suspendido del arco gracias al trabajo a tracción de las péndolas. Por otro lado, suponen una solución muy adecuada cuando el terreno de cimentación no es demasiado competente, ya que, al trabajar el tablero como un tirante, siempre a tracción, la componente horizontal que llega al terreno en la cimentación desaparece, existiendo únicamente componente vertical. Finalmente, el reparto de las cargas a través de sus elementos es muy intuitivo, con un arco trabajando a compresión y unas péndolas y un tablero trabajando a tracción. Además, gracias a la limpieza de los arcos, constituyen una solución muy valorada desde el punto de vista estético, con una integración completa en el medio. Por otro lado, con independencia de la potencia que presenta desde el punto de vista gráfico, la modelización mediante AutoCAD 3D constituye una solución muy limitada, la cual presenta una gran rigidez y encorsetamiento para el usuario. La posibilidad de desarrollar modelos paramétricos, en los cuales la casuística de combinaciones no tiene límites, deja claramente en desventaja al modelado mediante AutoCAD 3D. Finalmente, A medida que se profundiza en la materia del modelado paramétrico y el usuario se familiariza con el nuevo entorno, rápidamente se llega a la conclusión de que, esta metodología no tiene ningún tipo de limitación; la posibilidad de diseñar infinitas combinaciones de un elemento concreto y conectar todos los elementos entre sí para configurar un modelo, es una ventaja sin igual. Tal y como se ha comentado con anterioridad, las limitaciones existen en la ambición del propio usuario y en lo que éste pretenda modelizar. A su vez, la conexión con herramientas paramétricas de tipo estructural para su posterior análisis, ofrece un abanico de posibilidades muy grande, a través del cual, se modeliza una determinada estructura, con sus infinitas combinaciones asociadas y es posible transferir esas infinitas combinaciones a la herramienta de tipo estructural para su cálculo y análisis.

Referencias:

- Ministerio de fomento, 2003. Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras, RPM-95. Dirección General de Carreteras.
- Payne, A.O. 2009. The Grasshopper Primer. Second Edition.
- Argüelles, R. y Arriaga, F, 2013. Estructuras de acero. Fundamentos y cálculo según CTE, EAE y EC3. Tomo 1.Tercera edición.

ABSTRACT

TFM title: Juan José Arenas Chair: Parametric model and structural análisis of Barqieta arch bridge

Author: Efrén Miguel Calleja López

Director: Guillermo Capellán Miguel

Santiago Guerra Soto

Call: June 2020

Key words: Arch bridge, pressure line, antifunicularity, central core, bending moment, axial force, calculation model, parametric model, visual programming, Grasshopper, Karamba 3D, SAP 2000, IAP-11

Approach: The following master's thesis is aimed at analysing and studying the behaviour of arch bridges, in particular, arch bridges with a lower deck. The objective is to carry out a comparative structural analysis of the different configurations that can be established in them, both in their guidelines and in their cross sections. On the other hand, another of the main objectives of this end-of-master's work consists of making a complete and compact parametric model of the bridge which is the subject of this analysis.

Resolution: Firstly, a three-dimensional model of the La Barqueta bridge will be developed; this model will be carried out using a conventional design methodology, such as AutoCAD 3D. In view of the limitations that this methodology entails, a parametric model will be developed later, in which all the elements will be interconnected, being the same, completely variable, adapting to any situation that the user may wish. To do this, visual programming will be used from Grasshopper. Once a solid and compact parametric model has been made, a calculation base model will be established; this model will have the particularity of being connected to the parametric model, in such a way that it will be possible to analyze and generate infinite calculation models, since they assume the infinite combinations of the parametric model. This calculation model will be carried out using Karamba 3D. Taking into account that, in Karamba 3D, it is not possible to define complex cross sections, it is necessary to perform the structural calculation using SAP2000. On the other hand, the structural analysis starts by defining, in the parametric model, the central core of each of the arc's sections; in this way, by extension, the envelope of the central cores of the arc's sections will be generated. Once this envelope has been defined, the structure will be loaded, and from the results obtained, the pressure line of the arc will be determined. The aim is to find a combination of the guideline and the sections of the arc for which the associated pressure line is always within the generated central core envelope, so that the arc is always compressed.

Conclusions: Arch bridges with a lower deck are a solution in which the entire arch is located above the deck; this deck is completely suspended from the arch thanks to the traction work of the hangers. On the other hand, they are a very suitable solution when the foundation soil is not very competent, since, by working the deck as a brace, always under traction, the horizontal component that reaches the soil in the foundation disappears, and there is only a vertical component. Finally, the distribution of the loads through its elements is very intuitive, with an arch working in compression and some hangers and a board working in traction. Furthermore, thanks to the cleanliness of the arches, they constitute a highly valued solution from the aesthetic point of view, with complete integration into the environment. On the other hand, regardless of the power it presents from the graphic point of view, modelling using AutoCAD 3D is a very limited solution, which presents a great rigidity and tightness for the user. The possibility of developing parametric models, in which the casuistry of combinations has no limits, clearly puts AutoCAD 3D modelling at a disadvantage. Finally, as the subject of parametric modelling is deepened and the user becomes familiar with the new environment, it is quickly concluded that this methodology has no limitations whatsoever; the possibility of designing infinite combinations of a specific element and connecting all the elements together to configure a model is an unparalleled advantage. As previously mentioned, the limitations exist in the ambition of the user himself and in what he intends to model. At the same time, the connection with parametric tools of the structural type for subsequent analysis offers a very wide range of possibilities, through which a certain structure is modelled, with its infinite associated combinations and it is possible to transfer these infinite combinations to the structural type tool for its calculation and analysis.

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Los puentes arco constituyen una tipología estructural que, debido a la forma de los mismos, es capaz de resistir las cargas actuantes a través de un mecanismo resistente en el cual predominan los esfuerzos de compresión.

Dentro de éstos, existen distintas tipologías, dentro de las cuales pueden encontrarse: puentes arco con tablero superior, puentes arco con tablero intermedio y puentes arco con tablero inferior. El objetivo fundamental de este trabajo de fin de máster reside en analizar el comportamiento del arco que constituye los puentes arco con tablero inferior. Con el fin de lograr dicho objetivo, se analizarán posibles variaciones y combinaciones en la directriz del mismo, así como en las distintas secciones transversales que lo componen; para cada una de esas variaciones, se obtendrá y analizará la línea de presiones del arco, asociada a los estados de carga que actúan sobre la estructura.

Por otro lado, el mundo de la ingeniería está sujeto a cambios constantes, en el cual, conforme avanza la tecnología, se presentan nuevas metodologías de trabajo y nuevos campos a explorar. Debido a esto, se requiere una adaptación constante, con el fin de implementar dichas metodologías de trabajo como herramientas para el diseño, cálculo y la realización de los proyectos. Una de dichas metodologías de trabajo, es la realización de modelos paramétricos. Esto supone otro de los objetivos principales de este trabajo de fin de máster, la correcta definición y concepción de un modelo paramétrico de un caso concreto a analizar, en el cual, todos los elementos que lo componen estén interconectados entre sí y existan relaciones de dependencia entre los mismos, con la finalidad de lograr un modelo sólido, compacto y completamente variable según las necesidades del usuario.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

1.1. METODOLOGÍA BIM. INTRODUCCIÓN

La realización de modelos 3D, en el ámbito de la ingeniería, juega un papel fundamental de cara a la concepción e interpretación de los elementos que configuran las distintas estructuras; todo ello, parte de un proceso riguroso de representación e interiorización de los elementos en el plano, con el fin de poder realizar una representación espacial.

La metodología BIM tiene como fundamento la ejecución de modelos tridimensionales de una determinada estructura, de tal forma que, cada elemento que la constituye, contenga la información necesaria para que dicha modelización se ajuste a la realidad. Se basa en un manejo de la información coherente, coordinado y continuo, empleando para ello, una o más bases de datos compatibles entre sí, las cuales contengan toda la información asociada a la estructura que se pretende modelizar (Adaptado de Coloma, 2008). La compatibilidad entre las distintas bases de datos, es lo que garantiza la interoperabilidad y comunicación entre las diversas herramientas computacionales que puedan emplearse para analizar la información contenida en los modelos tridimensionales, de tal forma que, dicha información, pueda ser transmitida y analizada en un lenguaje comprensible entre una herramienta y otra.

Es por esto que, la implementación de la metodología BIM, cambia completamente la concepción de cualquier proyecto de ingeniería realizado en la actualidad, ya que, es posible definir y materializar todos los elementos que lo configuraran, pudiendo analizar y determinar su comportamiento antes de su ejecución.

No obstante, es importante señalar que, aunque la Metodología BIM permita dotar de una gran cantidad de información a los elementos que se diseñan, la conectividad entre las bases de datos que se define, excepto en casos muy concretos, supone una gran limitación, haciendo que los procesos de comunicación entre las diferentes herramientas no sean automáticos. Es por esto que, surgirá la necesidad de buscar alternativas para comunicar la información deseada, los cuales suponen un gran trabajo para el usuario que lo pretenda llevar a cabo, tal y como podrá comprobarse posteriormente, en los capítulos subsiguientes.

1.2. MODELO PARAMÉTRICO. RHINOCEROS. GRASSHOPPER

Desde un punto de vista teórico, un modelo paramétrico puede definirse como un conjunto de ecuaciones, interconectadas entre sí, las cuales representan un modelo geométrico en función de una serie de parámetros variables. Esta interconexión en el modelo, permitirá establecer relaciones de dependencia, a través de las cuales los elementos que se modelicen podrán estar interconectados entre sí. A su vez, dichas relaciones de dependencia entre los elementos, permiten diseñar una combinación infinita de geometrías a partir de la geometría definida inicialmente para unos determinados parámetros, los cuales, al ser variables por el usuario, permiten un abanico de posibilidades muy grande. Nótese que, dichas relaciones de dependencia, para obtener modelos sólidos y coherentes, han de estar correctamente definidas y establecidas. Conforme a lo que se describe en el Capítulo 3 de este trabajo de fin de máster, la modelización paramétrica no tiene ninguna limitación, siendo los objetivos y ambiciones del propio usuario, los que servirán de frontera para lo que se desee modelizar.

El desarrollo del modelo paramétrico que se llevará a cabo para analizar la situación de estudio, se realizará mediante Grasshopper, el cual se fundamenta en torno al concepto de la programación visual. A su vez, para la materialización y contextualización de los comandos, sentencias y códigos generados a partir de Grasshopper, se empleará Rhinoceros, el cual configurará el entorno gráfico del modelo. En definitiva, el modelo paramétrico se diseñará y desarrollará de forma integral mediante Grasshopper, estableciendo en él mismo todas las relaciones de dependencia y variables de entrada para generar el modelo, siendo Rhinoceros, el medio que nos permita visualizar el resultado de la programación llevada a cabo.

1.3. BASES DEL MODELO DE CÁLCULO. KARAMBA 3D

Para poder realizar el análisis estructural que se pretende llevar a cabo, es necesario incorporar el modelo paramétrico generado, a un medio que se capaz de comprenderlo y analizarlo. Para ello, se empleará Karamba 3D, la cual consiste en una herramienta de análisis paramétrico estructural que trabaja en el entorno de Grasshopper. De esta forma, es posible generar, previamente con el modelo paramétrico, una casuística muy grande de combinaciones geométricas del caso a analizar, para ser analizadas con la herramienta Karamba 3D. A partir de Karamba 3D es posible convertir todos los elementos generados en el modelo paramétrico, en elementos de tipo estructural, con sus características mecánicas y geométricas respectivas, con sus secciones transversales asociadas y con sus materiales correspondientes. Una vez definidos los elementos que configurarán la estructura, es posible determinar tanto, las condiciones de apoyo, como los diversos estados de carga a los cuales

la misma estará sometida. De esta forma, gracias al modelo paramétrico generado y la conexión con Karamba 3D, es posible calcular tantas combinaciones estructurales del caso a analizar, como se desee.

Independientemente de ello, existe una limitación que requiere realizar un paso adicional para proceder al cálculo estructural; la herramienta Karamba 3D permite asignar a los elementos estructurales secciones transversales estandarizadas y tipificadas, de tal forma que, esto no es de aplicación en el caso de estudio, el cual, como se desarrollará posteriormente, está compuesto por diversos elementos que cuentan con una diversa y variada configuración de secciones transversales, estando las mismas lejos, de ser estandarizadas. De esta forma, la herramienta Karamba 3D servirá como base para generar un modelo de cálculo, a través de la combinación deseada del modelo paramétrico, en el cual se definirán los elementos estructurales que lo componen y las condiciones de apoyo a disponer. Una vez generado el modelo de cálculo a analizar, dicho modelo paramétrico, convertido en estructura, será exportado en un lenguaje comprensible por una herramienta de cálculo estructural, en la cual, dicho modelo, podrá ser analizado y calculado.

De esta forma, Karamba 3D, tras realizar la conversión del modelo paramétrico en un modelo estructural, será el medio conductor, entre el diseño paramétrico y su cálculo correspondiente.

1.4. ANÁLISIS NUMÉRICO. CÁLCULO ESTRUCTURAL. SAP 2000.

SAP 2000 constituirá la herramienta de cálculo estructural a la cual se enviará la información generada por el modelo paramétrico, convertida previamente en conjunto estructural. Una vez haya sido transferida la información a través de Karamba 3D, la cual cuenta con los diferentes elementos que configurarán la estructura, así como con las condiciones de apoyo que se desean imponer, será necesario, a partir del mismo, definir los distintos materiales que componen dichos elementos estructurales, así como sus secciones transversales asociadas. La definición particular, de las secciones transversales en SAP2000, pasa por un proceso de diseño previo, el cual será realizado a partir de la herramienta AutoCAD 3D. Una vez hayan sido definidas las distintas secciones transversales de los distintos elementos, será necesario asignar dichas secciones a los elementos en cuestión; tras realizar la asignación, se definirán las cargas que actuarán sobre la estructura, para finalmente, proceder a la fase de carga de la misma.

CAPÍTULO 2. CASO DE ESTUDIO

Este capítulo recoge el caso de estudio a analizar, así como la modelización previa realizada mediante AutoCAD 3D del mismo. Con carácter general, se considera fundamental y necesario, previamente a cualquier modelización, cálculo y análisis, interiorizar y comprender la situación que se pretende estudiar; es por ello que, en esta primera fase, se ha depositado una gran dedicación, con el fin de comprender que elementos constituyen el caso de estudio, y por qué son esos elementos en concreto, y no otros, ya que si no se conoce a fondo el caso a tratar, resulta imposible representarlo, analizarlo y mucho menos, comprenderlo. Una vez analizados los elementos que constituirán el puente del caso de estudio, se realizará una modelización tridimensional del mismo, con el fin de materializar lo que previamente se ha analizado, sirviendo de punto de partida para facilitar la programación visual, mediante Grasshopper, para la definición del modelo de barras a emplear en el cálculo, mediante Karamba 3D, para el cálculo del modelo definido con anterioridad, mediante SAP2000, y para los análisis que se realizarán posteriormente de los resultados obtenidos.

2.1. LA BARQUETA. PUENTE ARCO INFERIOR.

El puente de la Baqueta supone un símbolo de la Exposición Universal de Sevilla 1992. Se trata de un puente arco metálico con tablero inferior tipo Bowstring; esta solución presenta ciertas singularidades con respecto a los puentes arco con tablero superior; por un lado, el tablero se encuentra suspendido totalmente del arco a partir de elementos de cuelgue trabajando a tracción; este trabajo a tracción, permite emplear secciones muy livianas para dichos elementos, tales como cables, perfiles abiertos, perfiles tubulares o barras. Por otro lado, a diferencia de los puentes arco con tablero superior, el empuje horizontal del arco queda atirantado por el propio tablero, de esta forma se evita que lleguen al terreno componentes horizontales y requiriendo del mismo, simplemente, capacidad resistente vertical. De esta forma, debido al trabajo del tablero como tirante, es posible emplear este tipo de arcos prácticamente con independencia de las condiciones de la cimentación en el terreno.

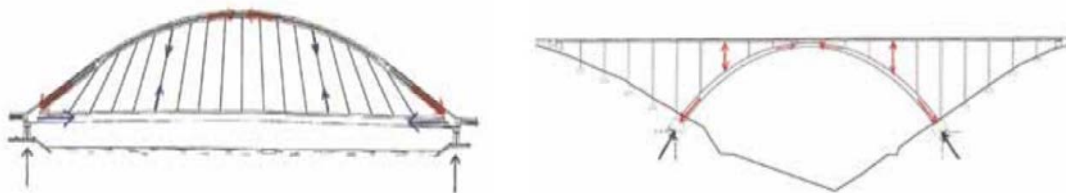


Figura 1. Comportamiento estructural de los elementos del puente arco inferior frente al puente arco superior (Arenas & Asociados, 2020).



Figura 2. Puente de la Barqueta. Lado Cartuja. (Arenas & Asociados, 2020).

El puente de la Barqueta, con una luz de 168 m sobre el río Guadalquivir, se encuentra apoyado en cuatro soportes verticales distanciados entre sí 30 m en sentido transversal; está compuesto por un arco central elevado que nace y muere en los vértices de sendos pórticos triangulares, los cuales constituyen los pies inclinados que sirven de elemento de unión, junto con las péndolas, entre el tablero y el arco. Dichos pórticos triangulares, reciben la fuerza axial del arco, evitando que éste termine ocupando la zona central del tablero. Las secciones transversales, tanto del arco como de los pies inclinados, cuentan con surcos profundos y rehundidos, que además de calidad estética, proporcionan suficiente inercia local para evitar la necesidad de cualquier tipo de rigidizador longitudinal interno. Finalmente, los nudos rígidos, los cuales conectan el arco central con cada par de pies inclinados, representan los puntos de unión de la estructura, estando conformados con chapas internas que establecen conexión directa entre cada par de chapas homólogas del arco y los pies inclinados. (Adaptado de Arenas & Asociados, 2020).



Figura 3. Puente de la Barqueta. Alzado. (Arenas & Asociados, 2020).

2.2. INTERPRETACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO. MODELO CAD 3D.

Para poder proyectar cualquier estructura, es fundamental conocer la forma en la que dicha estructura va a ser construida. Esta dependencia, forma un binomio indisoluble, el cual es necesario contemplar durante el proceso de diseño y cálculo, no solo por las penalizaciones que, en algunos casos supone el proceso constructivo en sí, asociadas a estados de carga distintos a los que la propia estructura estará sometida a lo largo de su vida en servicio, sino por la posibilidad de materializarla en la ubicación en la que dicha estructura va a cumplir el fin y los objetivos para los que fue proyectada. Por consiguiente, dado que este capítulo inicial, supone un ejercicio de reflexión sobre la situación de estudio, esta metodología es la que ha sido llevada a cabo para la realización de la modelización tridimensional previa.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, y a través de la interpretación de los planos del puente de estudio, se realiza un modelo 3D completo, y en detalle, de todos los elementos que configuran el puente del que es objeto este trabajo fin de máster.

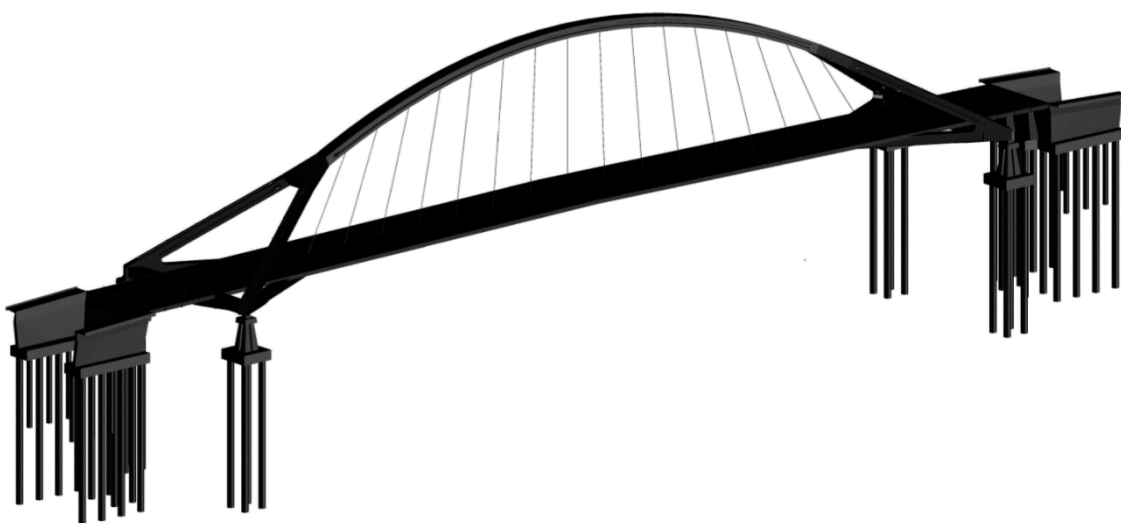


Figura 4. Modelo 3D del caso de estudio.

A continuación, se irán recogiendo los elementos que configuran la estructura del puente, así como los detalles de la modelización de los mismos:

- Estribos y cimentación de los mismos:
La cimentación está constituida por un encepado que recoge 18 pilotes. Dichos pilotes, tienen una longitud entre 26 y 12 m, con un diametro de

los mismos entre 100 y 125 cm. A su vez, la tipología de estribo es de tipo cerrado.

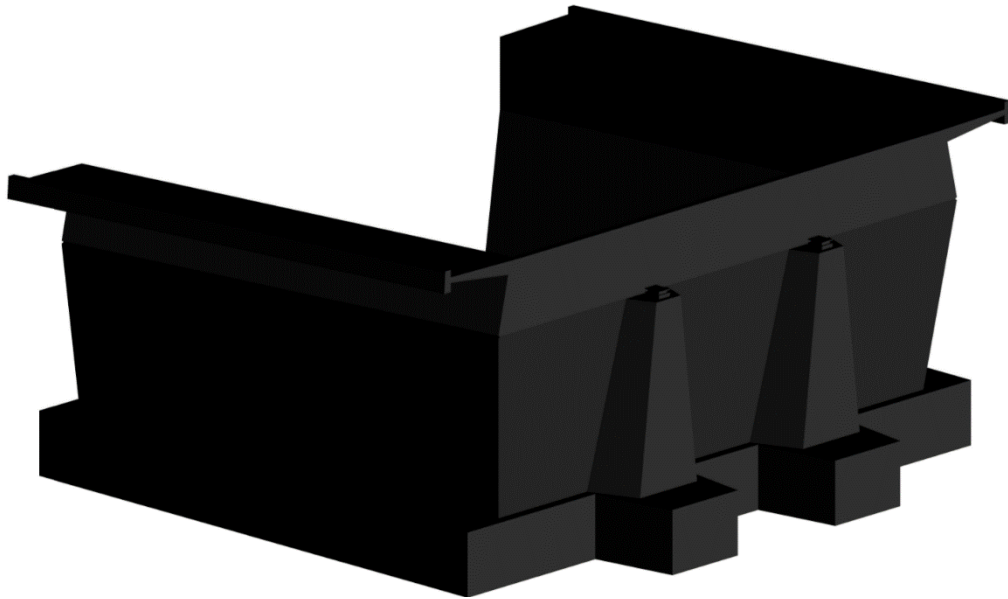


Figura 5. Modelo 3D. Estribo del puente de la Barqueta. Lado Cartuja.



Figura 6. Modelo 3D. Detalle Estribo y cimentación del puente de la Barqueta. Lado Cartuja.

- Soportes verticales y cimentación de los mismos:
Tal y como se ha señalado con anterioridad, el puente se encuentra apoyado en cuatro soportes verticales, a través de una traviesa de apoyo que recoge los pasos laterales que llegan desde los estribos y el tablero. La cimentación está ejecutada mediante pilotes, con una longitud de 26 m y un diámetro de 125 cm; a su vez, la distancia entre ejes de los mismos es de 30 m. Finalmente, los aparatos de apoyo son de neopreno zunchado de 400x300x74(53) mm³.

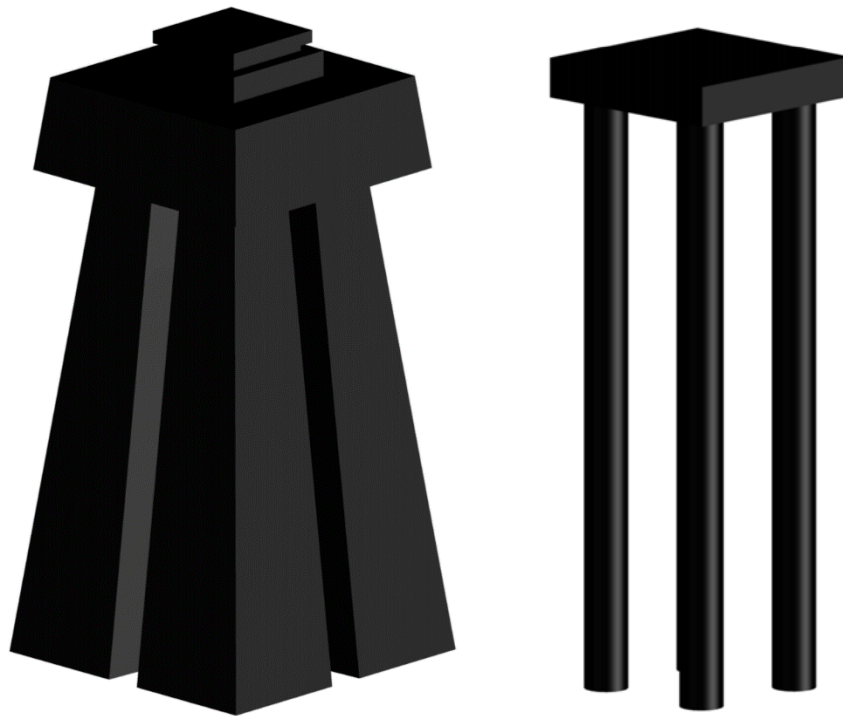


Figura 7. Modelo 3D. Apoyos del puente de La Barqueta y cimentación de los mismos. Aparatos de apoyo.

- Pasarelas laterales:
Una vez modelados los estribos y los apoyos que constituirán la estructura, se modelizan las pasarelas laterales, que sirven de elemento de transición entre los estribos y el tablero. Estas serán recogidas por las traviesas de apoyo, que descansarán sobre los apoyos definidos anteriormente. Están configuradas por una sección cajón metálica con rigidizadores longitudinales cerrados en la chapa de superior, y por rigidizadores en "L" en las almas del cajón y la chapa de fondo, con el fin de evitar el pandeo a torsión, las inestabilidades locales y proporcionar a la estructura una rigidez adecuada.

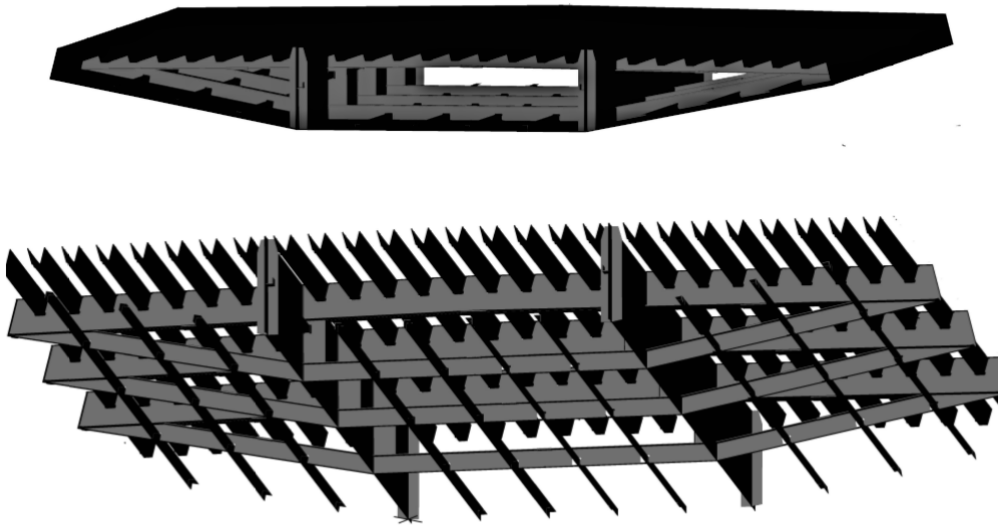


Figura 8. Modelo 3D. Pasarelas laterales del puente de La Barqueta. Detalle rigidizadores y secciones por diagrama.

- Traviesas de apoyo:
Una vez modelizadas las pasarelas de laterales que darán acceso al puente, se modelizan las traviesas de apoyo, las cuales sirven de unión entre las pasarelas laterales y el tablero. Dichas traviesas laterales, serán rigidizadas en sentido transversal.

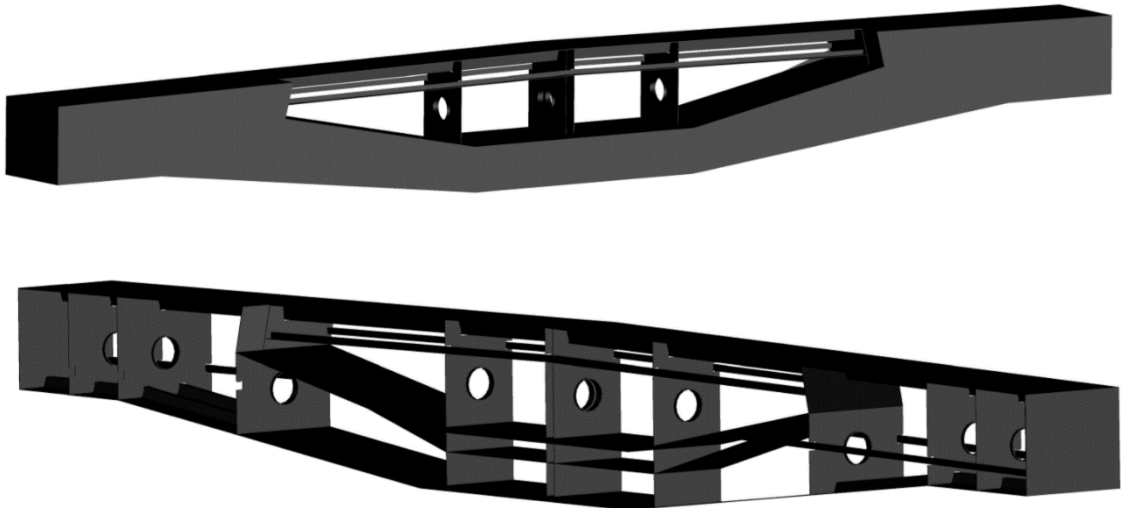


Figura 9. Modelo 3D. Traviesa de apoyo del puente de La Barqueta y cimentación de los mismos. Detalle rigidizadores y secciones por diagrama.

- Tornapuntas entre traviesa de apoyo y tablero:
Tras constituir las traviesas de apoyo, se modelizarán las tornapuntas que conectarán las traviesas de apoyo con el tablero. Dichas tornapuntas, están constituidas por la unión de dos perfiles doble “T” de acero S275.

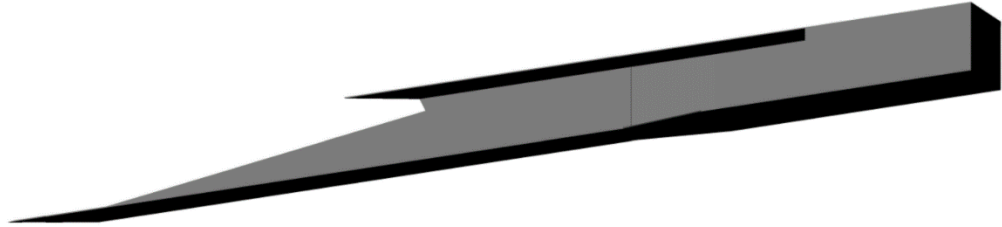


Figura 10. Modelo 3D. Tornapuntas del puente de La Barqueta. Detalle del plano de corte a soldar con el tablero.

- Nudo arranque pies inclinados. Pies inclinados:
El nudo de arranque de los pies inclinados, nace de la traviesa de apoyo y las tornapuntas, estando la misma configurada por la unión de chapas metálicas de acero S355. De la misma forma que ocurre con los apoyos y las secciones del arco que se modelizarán posteriormente, la sección de los pies inclinados cuenta con surcos profundos, con el fin de dotar a la sección de suficiente inercia local para evitar la necesidad de cualquier tipo de rigidizador longitudinal interno, tal y como se ve, en el detalle de las secciones por marco de los pies inclinados.

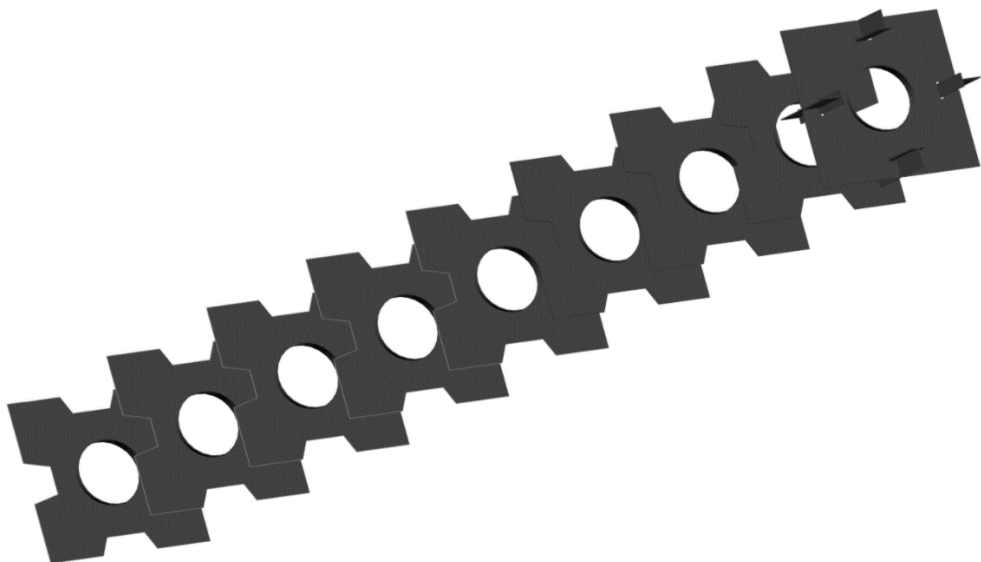


Figura 11. Modelo 3D. Secciones por marco pies inclinados de La Barqueta.



Figura 12. Modelo 3D. Pies inclinados de La Barqueta.

- Tablero:
El tablero, está configurado por una sección cajón metálica; el procedimiento para su modelización es análogo al empleado para modelizar las pasarelas laterales de acceso al puente. En este caso, la sección cuenta con rigidizadores longitudinales de tipo cerrado en la chapa de fondo, para evitar la abolladura de la misma y mejorar el comportamiento a pandeo por torsión. De la misma forma, cuenta con rigidizadores tipo “L” en las almas. Las secciones por marco, se definen cada 4 metros.

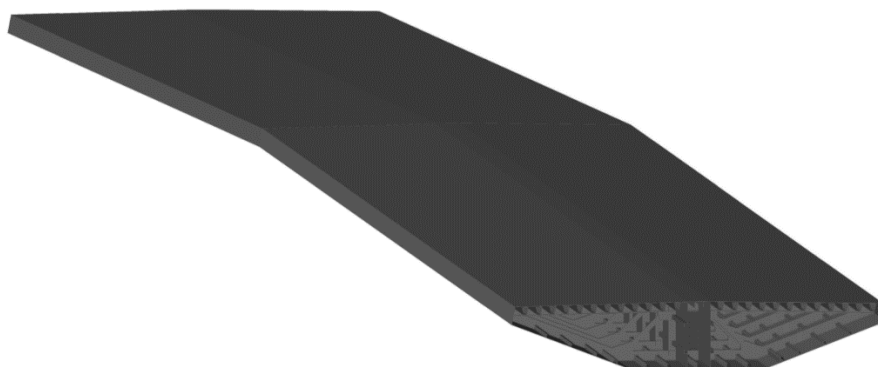


Figura 13. Modelo 3D. Tablero de La Barqueta.

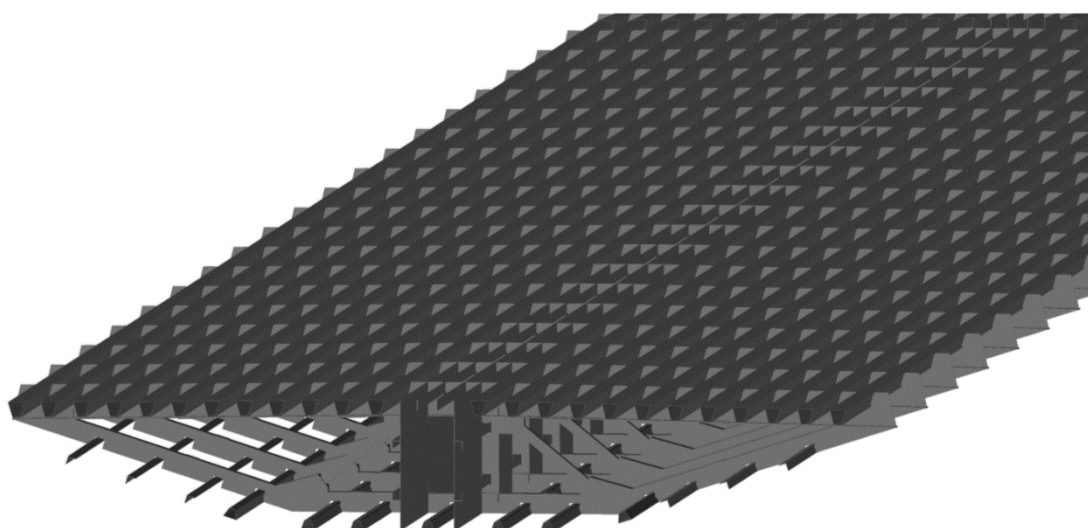


Figura 14. Modelo 3D. Secciones por diafragma Tablero de La Barqueta. Detalle de rigidizadores.

- Arco y péndolas:
El arco de la Barqueta, está configurado por cinco secciones transversales diferentes; siendo tres de ellas las que se extienden a lo largo de toda la directriz, mientras que las dos restantes son las que se configuran por enlace de las tres anteriores; de esta forma, se generan los rehundidos, los cuales han sido descritos con anterioridad. A su vez, la sección de las péndolas está formada por cables cerrados, con protección anticorrosiva, galvanizados con zinc-aluminio y una capa de protección externa de poliuretano. El diámetro de los cables oscila entre 850 mm² y 580 mm².



Figura 15. Modelo 3D. Arco de la Barqueta.

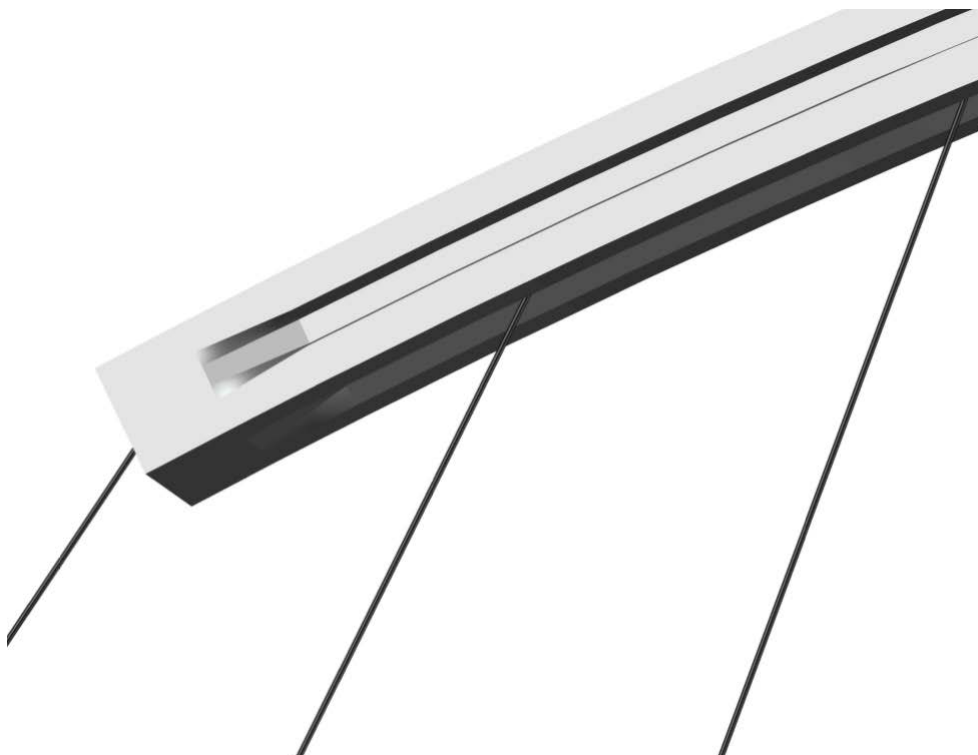


Figura 16. Modelo 3D. Enlace arco y péndolas de la Barqueta. Detalle de rehundido.

- Nudos rígidos:

Finalmente, se constituye el elemento que dará continuidad entre el arco y los pies inclinados. Los nudos rígidos están constituidos por chapas #36 en la zona de contacto con los pies inclinados y el arco, mientras que el resto de chapas empleadas son #30. Dada su compleja geometría, su modelización ha sido llevada a cabo mediante los planos que configuran las secciones finales de los pies inclinados y las secciones iniciales del arco.

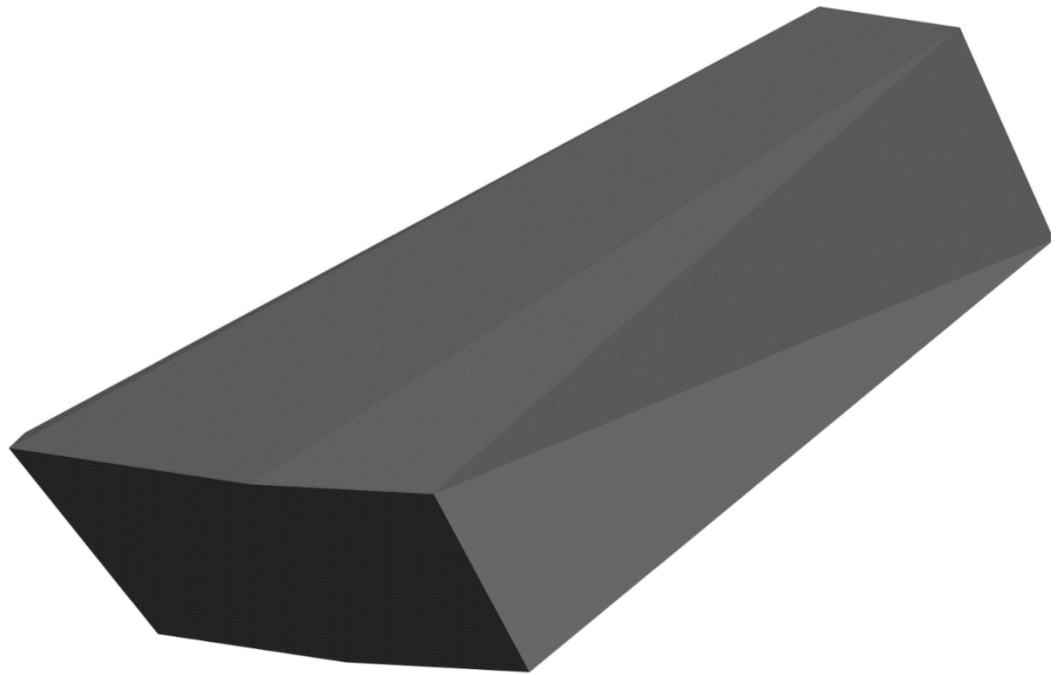


Figura 17. Modelo 3D. Nudos rígidos de la Barqueta. Elemento de unión entre pies inclinados y arco.

De esta forma, se definen completamente todos los elementos que constituyen la estructura a analizar; sirviendo como punto de partida, para el resto de modelizaciones y análisis que se llevarán a cabo a lo largo de los siguientes capítulos; la definición de las distintas características geométricas de los distintos elementos, se realizará en los puntos siguientes, cuando su empleo se requiera y justifique como variable de entrada.

CAPÍTULO 3. MODELO PARÁMETRICO DEL CASO DE ESTUDIO

Una vez concebido y analizado el puente de la situación de estudio, así como modelados los elementos que lo conforman, es posible pasar a la realización de una modelización paramétrica mediante programación visual, la cual permitirá obtener las infinitas combinaciones de elementos, geometrías, secciones y directrices; dicha modelización paramétrica, supondrá el punto de inicio para la comunicación entre las distintas herramientas computacionales que se emplearán en el caso de estudio a analizar a lo largo de este trabajo fin de máster.

La modelización paramétrica, tal y como se ha descrito en el Capítulo 1, se llevará a cabo mediante el lenguaje de programación visual Grasshopper, empleando como entorno gráfico para su visualización la herramienta computacional Rhinoceros 6. Cabe destacar que, esta tipología de modelización no presenta ninguna limitación ni restricción más allá de lo que el usuario quiera modelizar; teniendo esto en cuenta, aparece un abanico de posibilidades muy amplio, en el cual, los límites los establece el propio usuario. A su vez, cabe destacar la potencia de esta metodología de trabajo, y la importancia que tiene ésta como punto de partida, ya que es posible programar una casuística ilimitada de posibles geometrías de los distintos elementos que configuran la estructura, variando únicamente parámetros de entrada del modelo, para, posteriormente, transferirlo a un programa de cálculo y análisis; es decir, debidamente ejecutado el modelo paramétrico, y debidamente conectado, es posible tener una combinación infinita de geometrías estructurales, que, de forma automática, se conectan con un programa de cálculo y análisis estructural; no obstante, tal y como se detallará posteriormente en el Capítulo 5, existen ciertas restricciones, las cuales deberán ser abordadas.

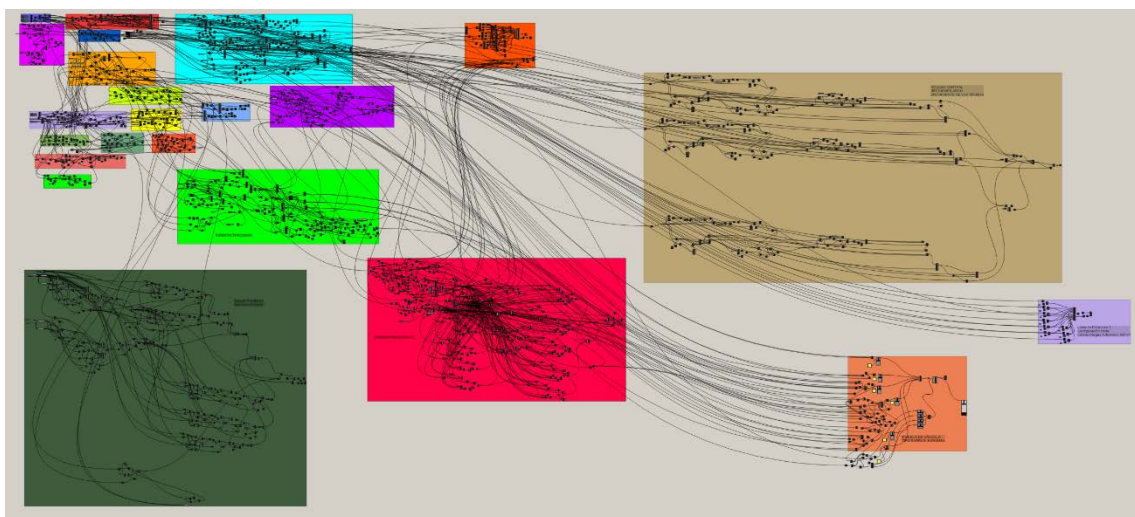


Figura 18. Modelización paramétrica. Esquema final general para la generación del modelo paramétrico de la Barqueta resultante.

A diferencia de la modelización mediante AutoCAD 3D, en la cual se trata de concebir los principales elementos que componen la estructura, relacionando los mismos con el proceso constructivo lógico a llevar a cabo, la modelización paramétrica se aborda desde un punto de vista y enfoque más práctico, en el cual, inicialmente se representarán las diferentes directrices que configuran los distintos elementos, con el fin de generar el esquema general del cuerpo central del puente a analizar. Una vez definidas las directrices de los distintos elementos, se programarán las secciones asociadas a los mismos.

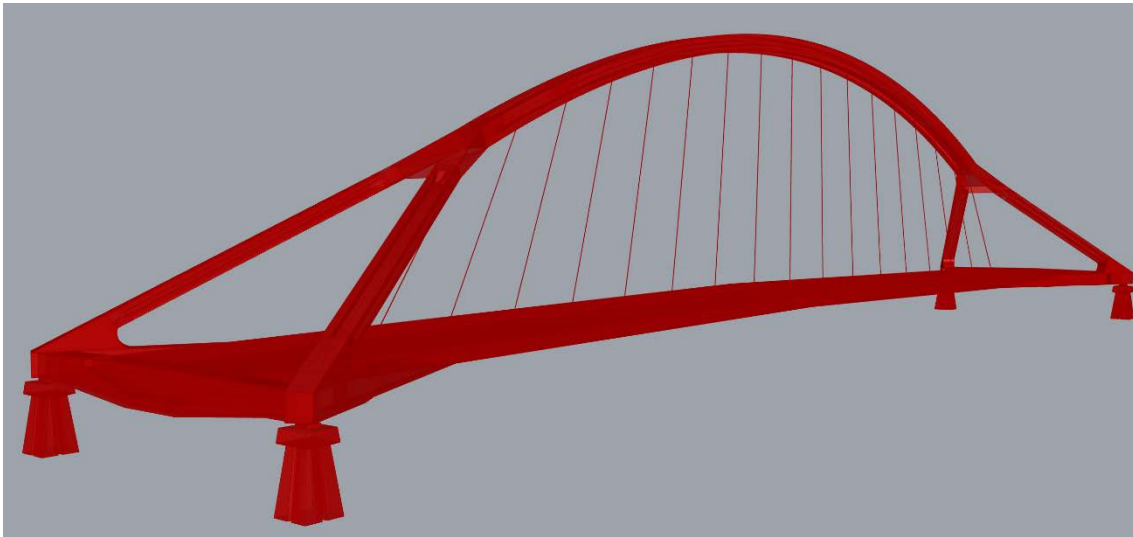


Figura 19. Modelización paramétrica. Modelo paramétrico de la Barqueta resultante.

Análogamente a lo realizado en el Capítulo 2, se describirá en detalle el proceso a seguir para llevar a cabo la modelización de los distintos elementos que configurarán el modelo; para ello, se analizará cada paquete de código, de forma individual, identificando las variables de entrada que requieren, así como la acción que ejecutan; a su vez, se describirán los paquetes de código que dependen de otros conjuntos de código.

- **Definición de la directriz del tablero:**

En primer lugar, y con la finalidad de ubicar el modelo que se ejecutará, se modelizará la directriz del tablero. Esto supone un punto de partida, para establecer en torno a la misma, los distintos elementos que se modelizarán.

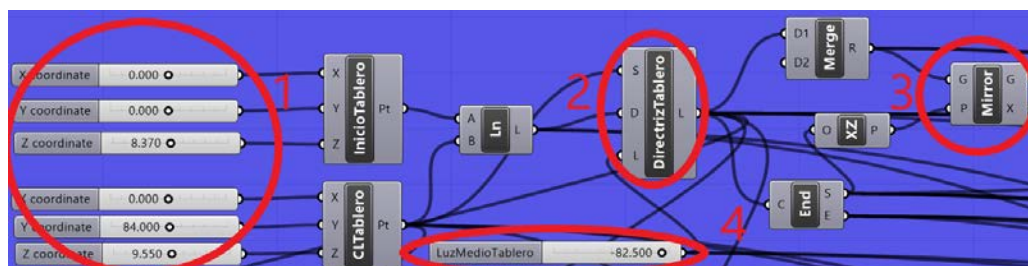


Figura 20. Modelización paramétrica. Detalle de la modelización del tablero.

- Conjunto 1: Teniendo en cuenta la simetría que presenta la situación de estudio, se representan los puntos de inicio y centro de luz de la directriz del tablero.
- Conjunto 2: A partir de los puntos del Conjunto 1, se declara una línea que comienza en el centro de luz del tablero, con la dirección compuesta por los puntos de inicio y centro de luz, y una longitud variable.
- Conjunto 3: Simetría, respecto del plano XZ, de la directriz media realizada.
- Conjunto 4: Valor numérico de entrada variable para constituir la longitud de las infinitas directrices.

Este paquete de código permite, realizar tantas combinaciones de directriz como se considere necesario.

- **Definición de la sección exterior del tablero:**

Una vez definida la directriz que configurará el tablero, así como sus posibles combinaciones, se modelizará la sección del tablero.

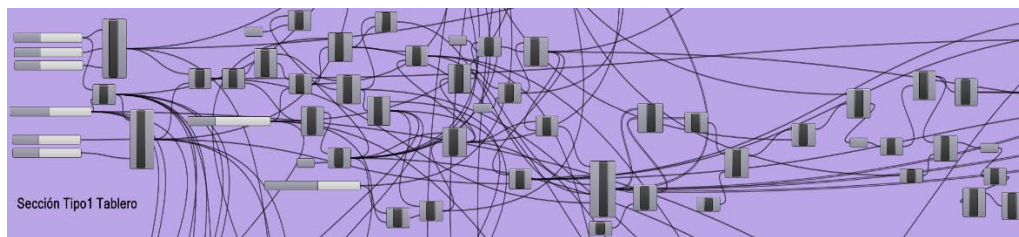


Figura 21. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de las secciones del tablero.

Este bloque de código, a su vez, recibirá la directriz del tablero, para poder generar las secciones del mismo en torno a ella.

- Conjunto 1: Ancho medio de la sección del tablero a definir por el usuario
- Conjunto 2: Posición del punto extremo de la chapa de fondo, respecto del punto medio, en función del ancho medio establecido.
- Conjunto 3: Canto medio del tablero a definir por el usuario.
- Conjunto 4: Relación de dependencia de coordenadas entre los puntos que configuran la sección, como suma de los puntos anteriores.
- Conjunto 5: Definición de la pendiente transversal del tablero.
- Conjunto 6 : Tras la representación en el plano XY la sección del tablero, se traslada al punto medio del tablero y se orienta según el plano XZ.

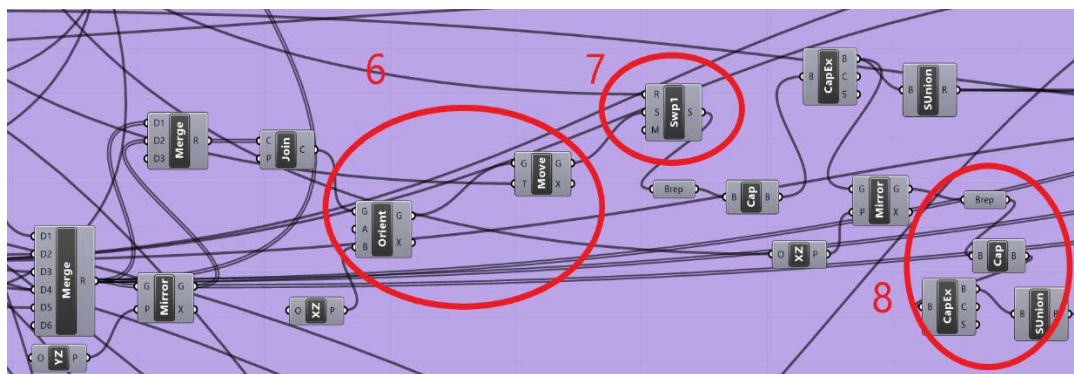
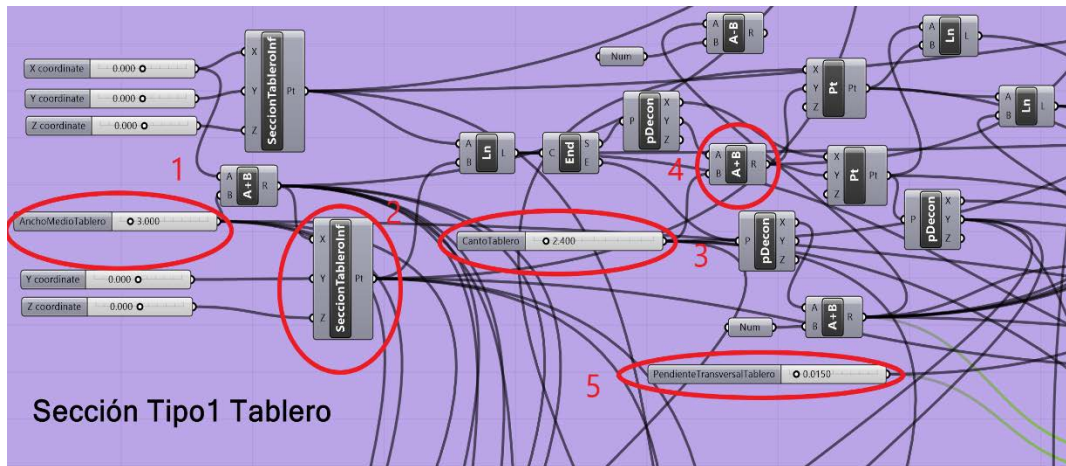


Figura 22. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de las secciones del tablero.

- Conjunto 7: Barrido de la sección del tablero a lo largo de la directriz variable definida con anterioridad.
- Conjunto 8: Generación del solido que compondrá la modelización de la sección del tablero.

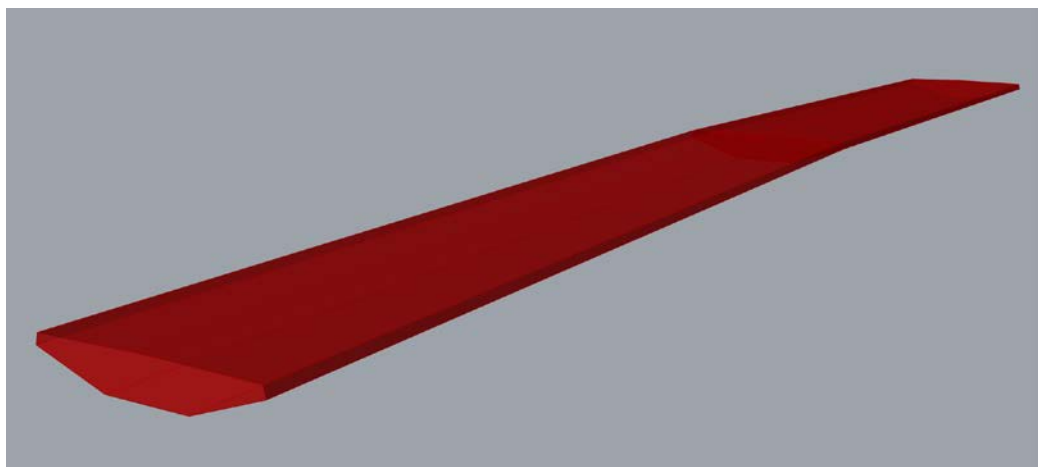


Figura 23. Modelización paramétrica. Configuración inicial de la sección del tablero del caso de estudio.

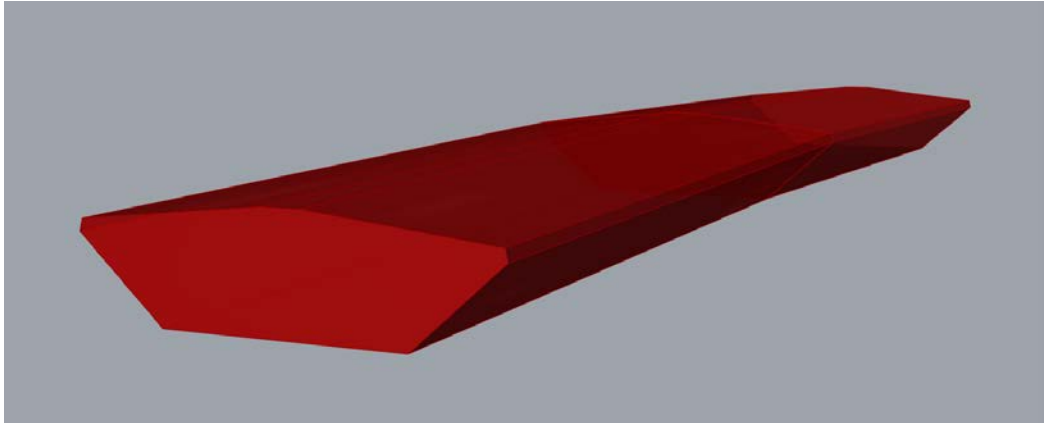


Figura 24. Modelización paramétrica. Variación de la directriz, canto, ancho y pendiente transversal de la configuración inicial de la sección del tablero del caso de estudio, mediante los bloques de código descritos con anterioridad.

- **Definición de los elementos que componen la sección del tablero:**

Una vez definidas las chapas exteriores que configurarán la sección del tablero, se modelizarán los rigidizadores que se disponen en el interior del mismo.

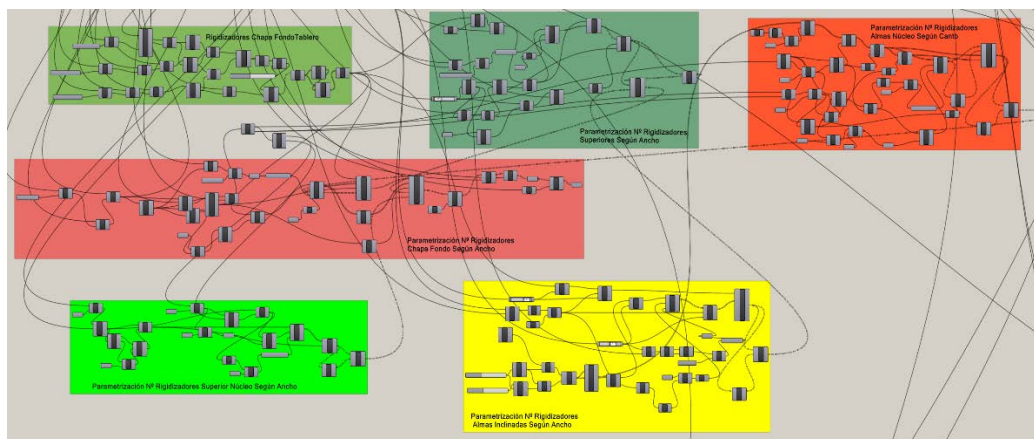


Figura 25. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de los rigidizadores que constituyen el tablero.

Tanto para la chapa superior, como para la chapa inferior y las almas del tablero, en primer lugar se modelizarán los rigidizadores longitudinales que están alojados en las mismas; las dimensiones de cada uno de los rigidizadores son variables por el usuario, y en una segunda variante, están asociadas a la geometría de la sección del tablero. Una vez, definida la geometría de los mismos, se programa una dependencia del número de rigidizadores con el ancho de la sección del tablero, tanto de la chapa superior, como de la chapa inferior y una dependencia del número de rigidizadores con el canto de la sección del tablero para las almas; de esta forma, para cada combinación a definir por el usuario, automáticamente

se generarán los rigidizadores necesarios acordes a las nuevas condiciones de combinaciones de geometría. Este proceso, se realiza para cada una las chapas y almas que componen el tablero, por lo que se desarrolla en detalle, un caso concreto de dichas combinaciones.

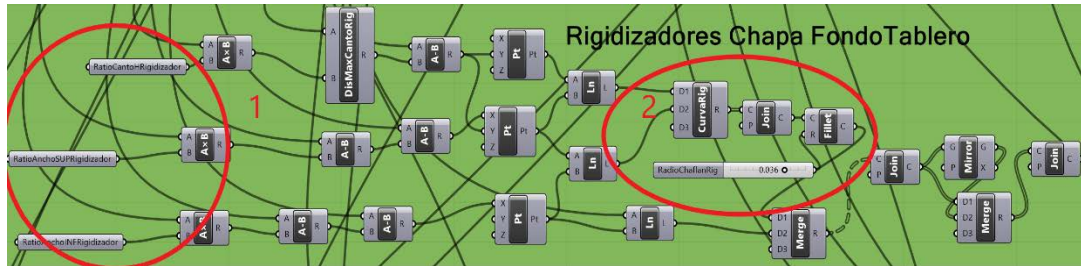


Figura 26. Modelización paramétrica. Definición de la geometría de los rigidizadores.

- Conjunto 1: Dependencia programada de la geometría de los rigidizadores con respecto de las dimensiones iniciales de la sección del tablero.
- Conjunto 2: Variación por parte del usuario del radio de curvatura de los rigidizadores longitudinales cerrados.

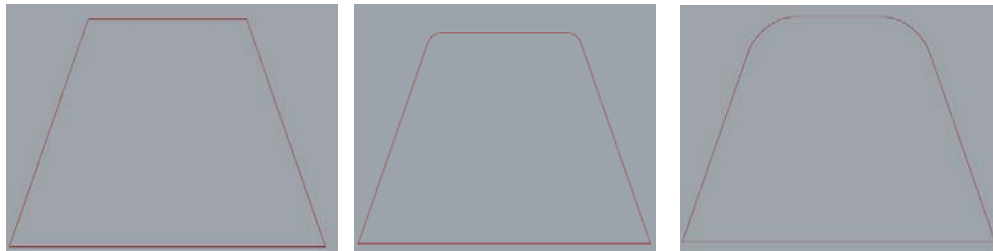


Figura 27. Modelización paramétrica. Variación del radio de curvatura de los rigidizadores a definir por el usuario.

- Conjunto 1: Determinación de la relación existente del número de rigidizadores actual con respecto a la geometría original de la sección del arco.
- Conjunto 2: Obtención programada y automática del número de rigidizadores que se dispondrán, según las condiciones de ancho de la sección del tablero definida por el usuario.
- Conjunto 3: Array lineal que general el número de elementos caracterizado en el Conjunto a lo largo de la chapa del tablero.

De esta forma, para cada configuración de geometría de la sección del tablero, se pueden obtener de forma predeterminada unas dimensiones de los rigidizadores, o bien ser definidas por el usuario, y se obtendrá el número de rigidizadores que le corresponderá a esa nueva disposición geométrica.

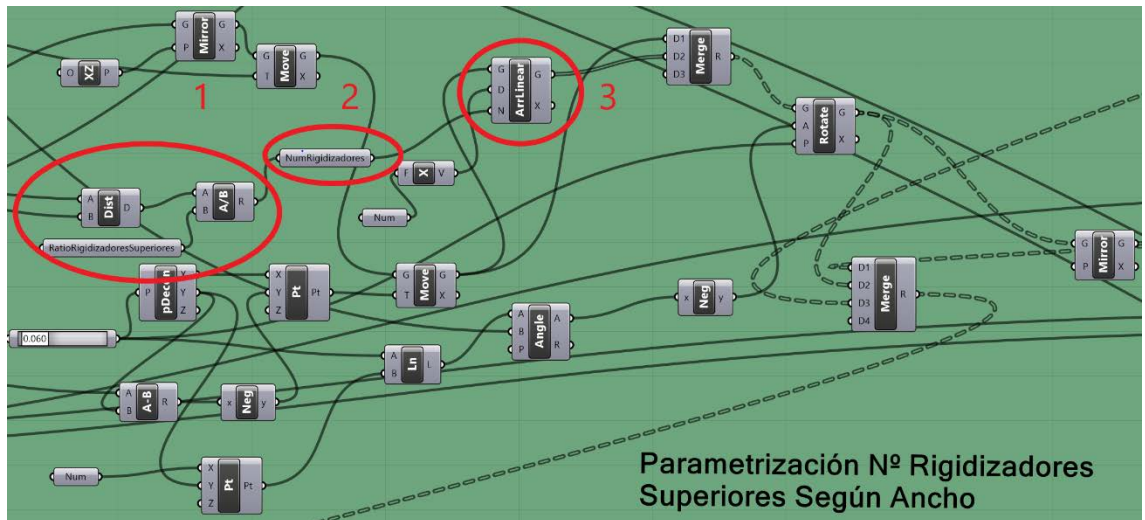


Figura 28. Modelización paramétrica. Programación del número de rigidizadores de la parte inclinada de la chapa superior de la sección del tablero.

Finalmente, los resultados tras la programación y modelización de los elementos que constituyen la sección del arco, son los siguientes:

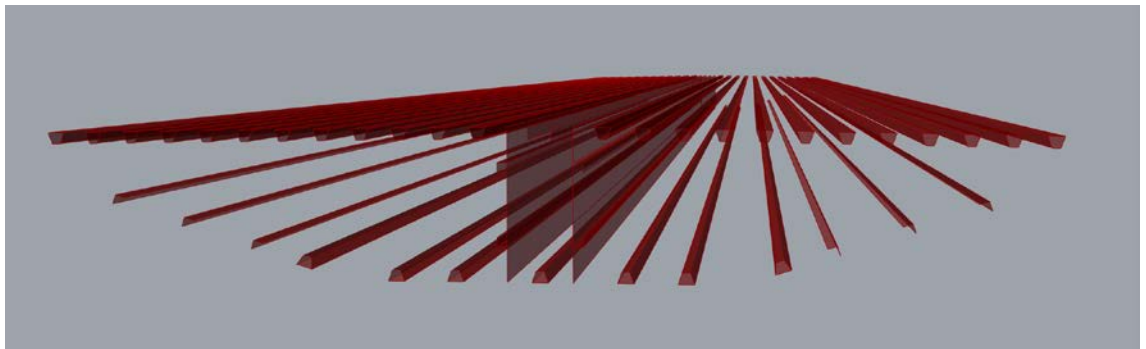


Figura 29. Modelización paramétrica. Modelización del número de rigidizadores para la configuración geométrica inicial del caso de estudio.

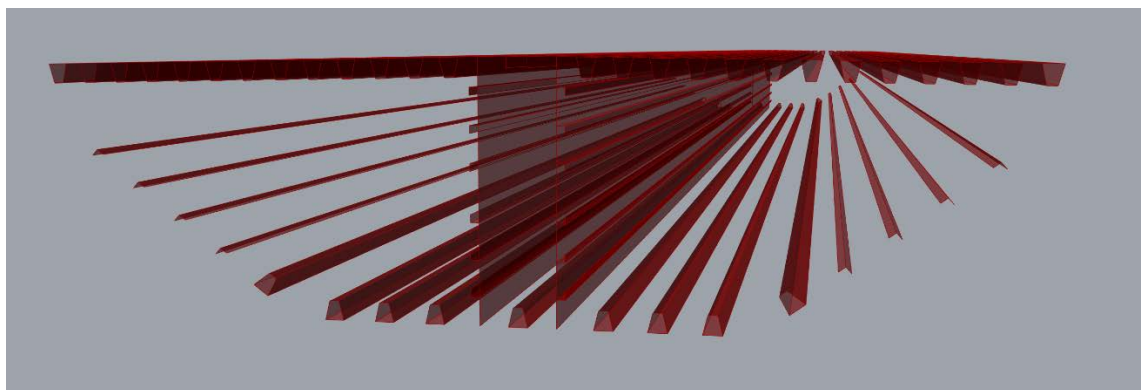


Figura 30. Modelización paramétrica. Generación automática del número de rigidizadores según una nueva geometría del caso de estudio.

- **Definición de la directriz del arco:**

Una vez modelizadas la directriz del arco y las secciones transversales del tablero, se procede a la modelización de la directriz del arco. El enfoque seguido para su determinación tiene una doble vertiente; en primer lugar, con el fin de programar de forma satisfactoria la directriz que compone al arco del caso de estudio, se modeliza, por puntos, a partir de las coordenadas definidas en los planos del proyecto, una directriz de tipo poligonal.

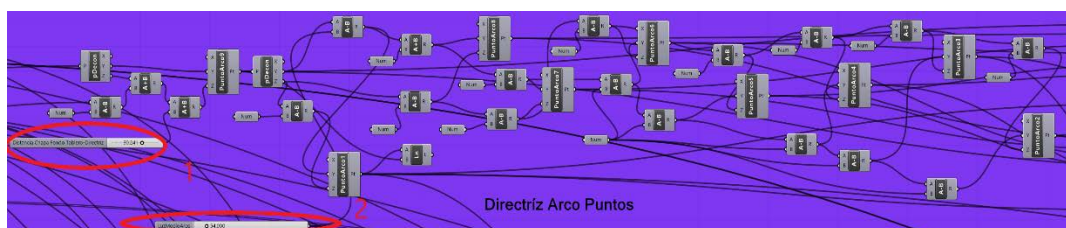


Figura 31. Modelización paramétrica. Definición de la directriz del arco caso de estudio a partir de las coordenadas de los planos de proyecto.

Nuevamente, a partir de las relaciones pertinentes, dicha directriz es paramétrica en su totalidad; de tal forma que, es posible variar la posición vertical del punto central del arco con respecto de la posición de la chapa de fondo, así como la luz del mismo. Todos los puntos restantes, que componen dicha directriz, estarán vinculados con la nueva configuración que se disponga para el punto central del tablero.

- Conjunto 1. Variación de la flecha de la directriz del arco con respecto de la posición de la chapa de fondo.
- Conjunto 2: Variación de la luz del arco.

Una vez que dicha directriz ha sido representada, se realiza una interpretación de la misma, con el fin de obtener la curva de mejor ajuste.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos que configuran la directriz del arco.

| Sección Tipo | Sobre base media | cota tirante | incr. cota directriz arco (mm) | cota directriz arco (m) | y(m) | cota(m) sobre fondo tablero |
|--------------|------------------|--------------|--------------------------------|-------------------------|-------|-----------------------------|
| 1 | - | - | - | 26,954 | 0 | 17,404 |
| 3 | 605 | 29,934 | 147,5 | 30,0815 | 6,75 | 20,5315 |
| 5 | 600 | 32,591 | 150 | 32,741 | 13,5 | 23,191 |
| 5 | 600 | 34,791 | 150 | 34,941 | 20,25 | 25,391 |
| 5 | 600 | 36,56 | 150 | 36,71 | 27 | 27,16 |
| 5 | 600 | 37,918 | 150 | 38,068 | 33,75 | 28,518 |
| 5 | 600 | 38,878 | 150 | 39,028 | 40,5 | 29,478 |
| 5 | 600 | 39,451 | 150 | 39,601 | 47,25 | 30,051 |
| 5 | 600 | 39,641 | 150 | 39,791 | 54 | 30,241 |

A través de la realización del ajuste de los puntos de la directriz a una curva, se obtiene que la curva de mejor ajuste asociada a los mismos es un arco de circunferencia, tal y como puede verse a continuación.

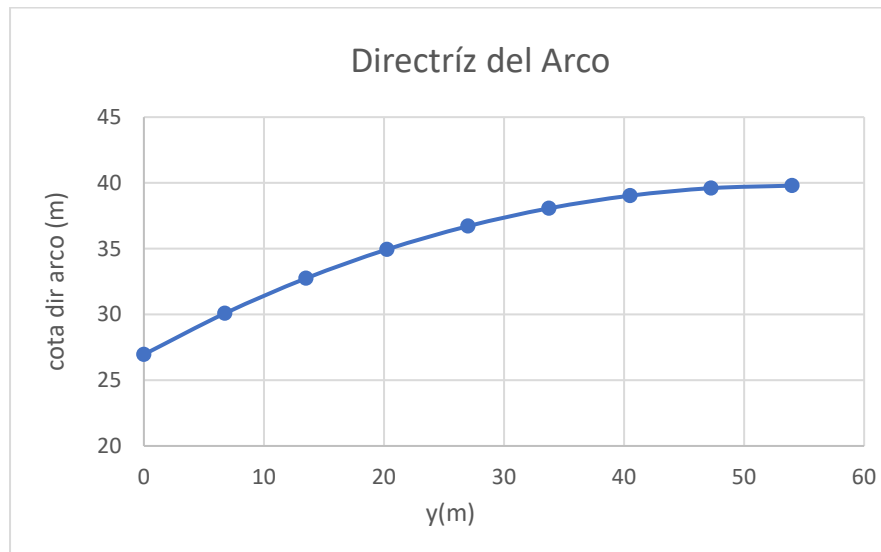


Figura 32. Modelización paramétrica.Obtención de la curva de mejor ajuste del caso de estudio a partir de las coordenadas de los planos de proyecto.

A partir de los resultados obtenidos, se realiza la modelización de la directriz del arco mediante programación visual. Cabe destacar que, esta nueva directriz, tendrá como parámetro de entrada el punto central del arco, el cual se ha definido con anterioridad y que, servirá como referencia, para realizar las variaciones tanto en flecha, como en luz de la directriz del arco.

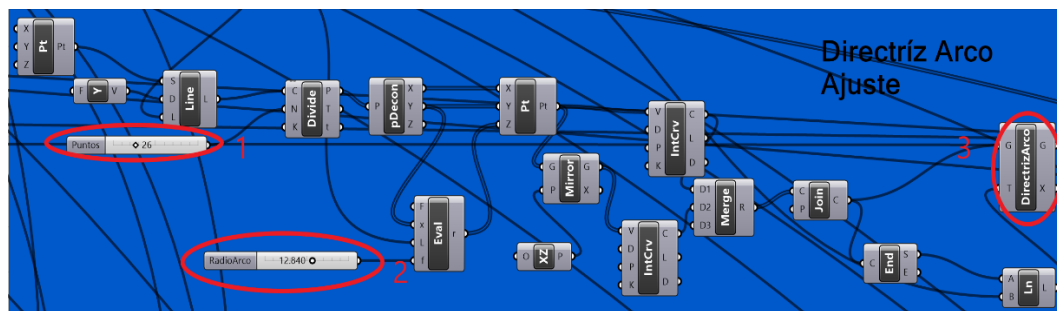


Figura 33. Modelización paramétrica.Parametrización y modelización de la directriz del arco del caso de estudio a partir de la curva de mejor ajuste.

- Conjunto 1. Número de puntos que componen la curva de ajuste de la directriz.
- Conjunto 2: Variación del radio del arco de circunferencia.
- Conjunto 3: Directriz resultante tras la modelización del ajuste.



Figura 34. Modelización paramétrica. Directriz resultante tras la modelización del caso de estudio.

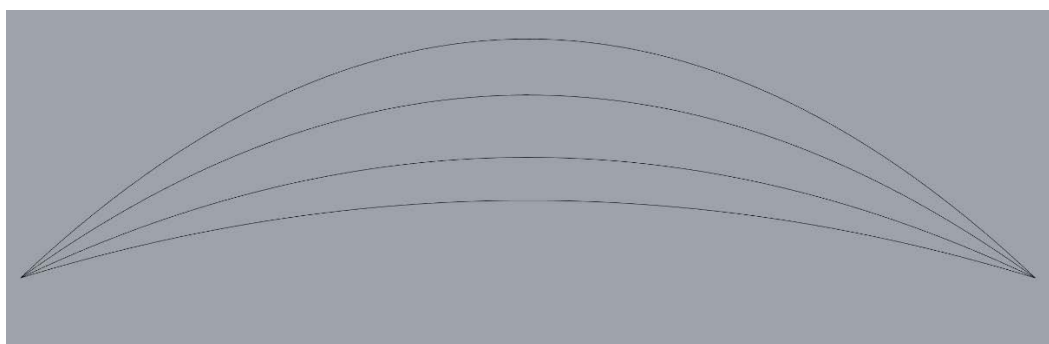


Figura 35. Modelización paramétrica. Casuística de posibles directrices del arco del caso de estudio tras la parametrización.

- Definición de las secciones del arco:

Tal y como se ha descrito en el Capítulo 2, el arco está constituido por cinco secciones transversales; siendo tres de ellas las que configuración las secciones tipo, y las dos restantes las obtenidas mediante extensión y elevación entre las anteriores. La modelización de las distintas secciones, tiene una doble complejidad asociada; en primer lugar, surge la necesidad de definir “subcurvas” dentro de la curva que representa la directriz del arco, con el fin de determinar los dominios en los que estarán comprendidos las secciones del arco y poder extender las mismas a lo largo de los mismos; para ello, se requiere evaluar la directriz en cuestión en los puntos reales que configuran el caso de estudio, y entre esos puntos, establecer los distintos dominios. Por otro lado, para que la modelización del arco sea adecuada, se requiere orientar las secciones del mismo de forma perpendicular en cada punto a las subcurvas definidas previamente.

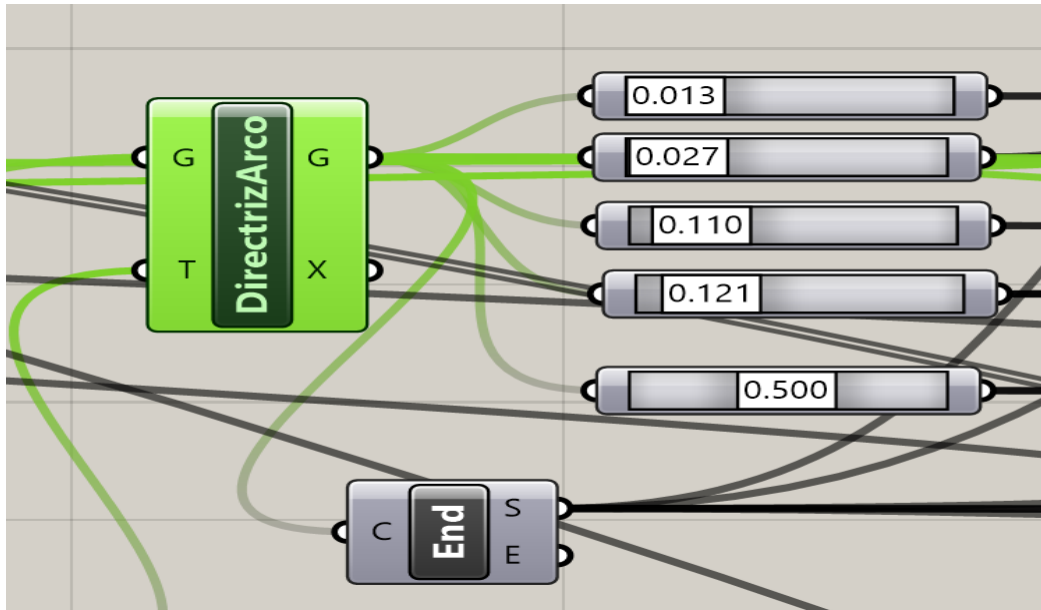


Figura 36. Modelización paramétrica. Evaluación de los distintos puntos de la directriz curva que conformarán los límites de generación de las secciones transversales del arco.

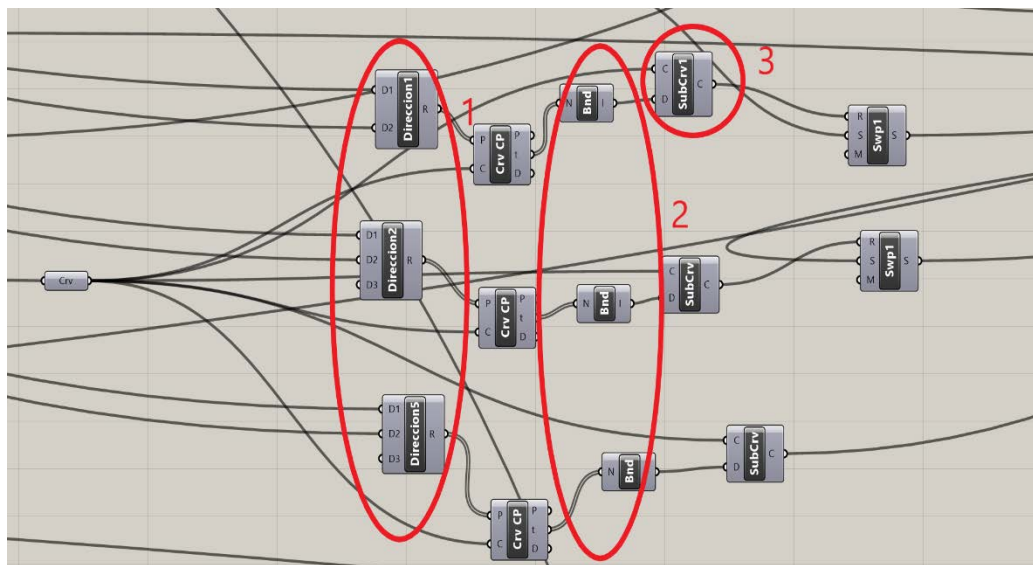


Figura 37. Modelización paramétrica. Determinación de las subcurvas en las que se extenderán las diversas secciones. Definición de dominios.

- Conjunto 1. Dirección formada por los puntos de la directriz a evaluar.
- Conjunto 2: Dominio a establecer para la subcurva.
- Conjunto 3: Subcurva creada, a partir de la dirección de las curvas evaluadas dentro de la curva inicial, y limitadas por el dominio definido.

Por consiguiente, será necesario, en primer lugar definir las distintas secciones que constituyen el arco, para, posteriormente orientarlas de forma perpendicular respecto de las “subcurvas” en cada uno de los puntos infinitamente próximos que las constituyen, con el fin de poder extenderlas a lo largo de los dominios definidos.

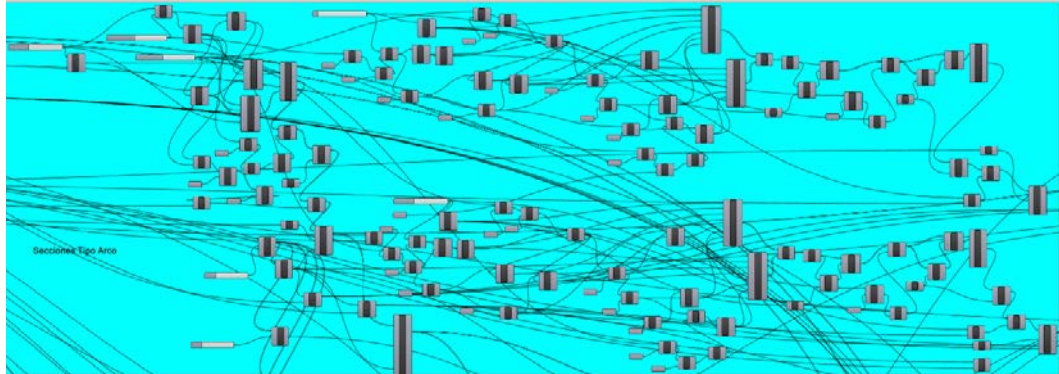


Figura 38. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de las secciones tipo que constituyen el arco.

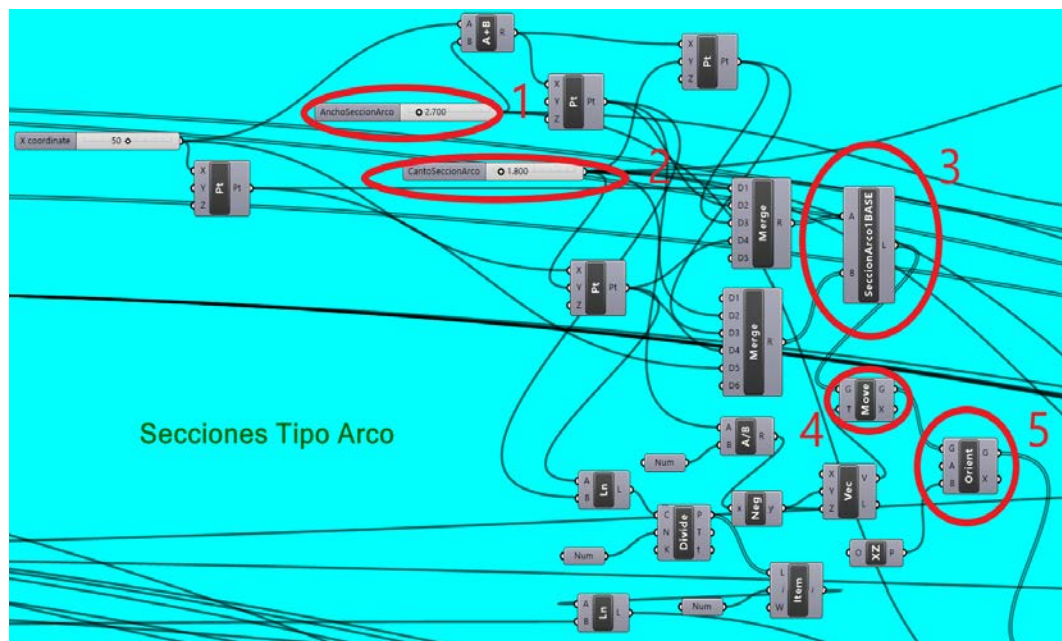


Figura 39. Modelización paramétrica. Definición de la sección inicial que configura el arco.

- Conjunto 1. Definición variable del ancho de la sección del arco a definir por el usuario.
- Conjunto 2: Definición variable del canto de la sección del arco a definir por el usuario.
- Conjunto 3: Materialización de la sección inicial del arco.
- Conjunto 4: Traslación desde el punto central de la sección inicial del arco en el plano XY al punto inicial de la directriz del arco.
- Conjunto 5: Orientación en el punto inicial de la directriz del arco en el plano XZ.

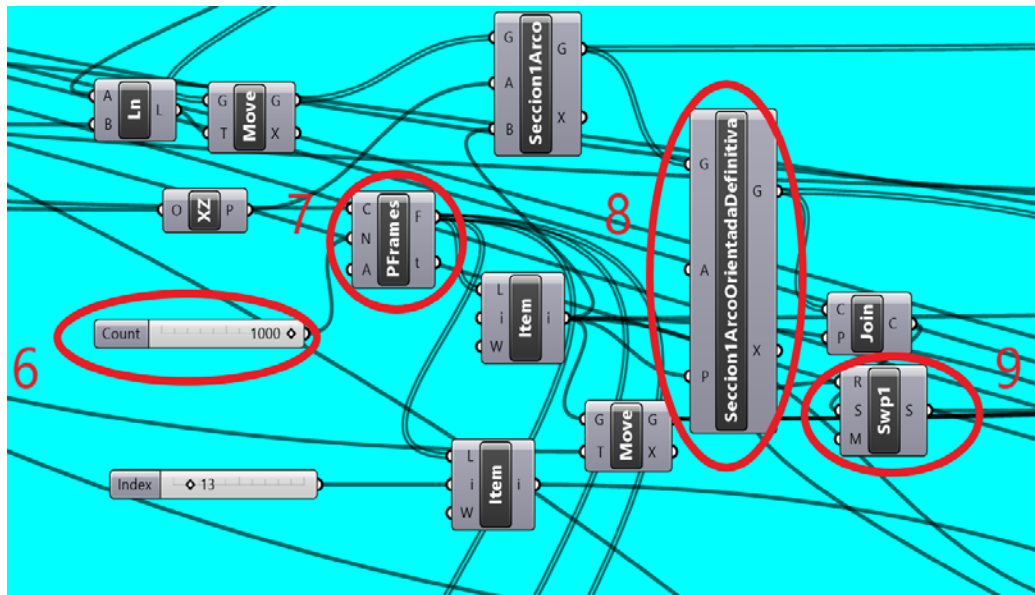


Figura 40. Modelización paramétrica. Orientación de las secciones en puntos infinitamente próximos perpendicularmente a las subcurvas definidas.

- Conjunto 6: Número de puntos considerados dentro del dominio definido de la “subcurva”.
- Conjunto 7: Generación de planos perpendiculares en cada punto definido en el Conjunto 6. Adicionalmente, se requiere definir como variable de entrada la “subcurva” que se está analizando.
- Conjunto 8: Orientación de las secciones, en cada uno de los puntos y los planos definidos en los Conjuntos 6 y 7 a lo largo del dominio. Adicionalmente, recibe como variable de entrada la sección del arco que se precisa orientar.
- Conjunto 9: Generación del sólido que constituirá la sección del arco introducida.

Tras llevar a cabo este proceso para cada una de las secciones del arco, en cada una de las “subcurvas” definidas, se consigue modelizar el arco de la situación de estudio.

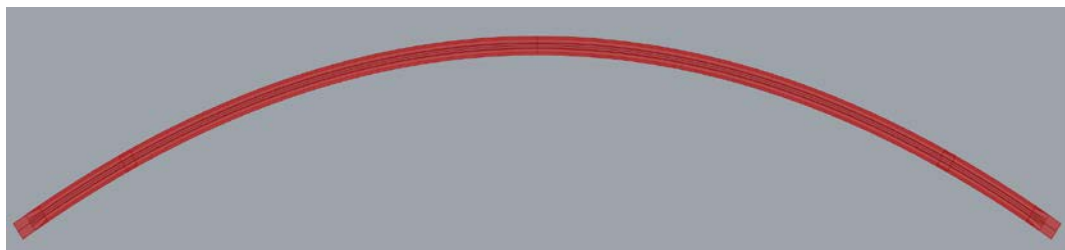


Figura 41. Modelización paramétrica. Modelización del arco del caso de estudio. Alzado.

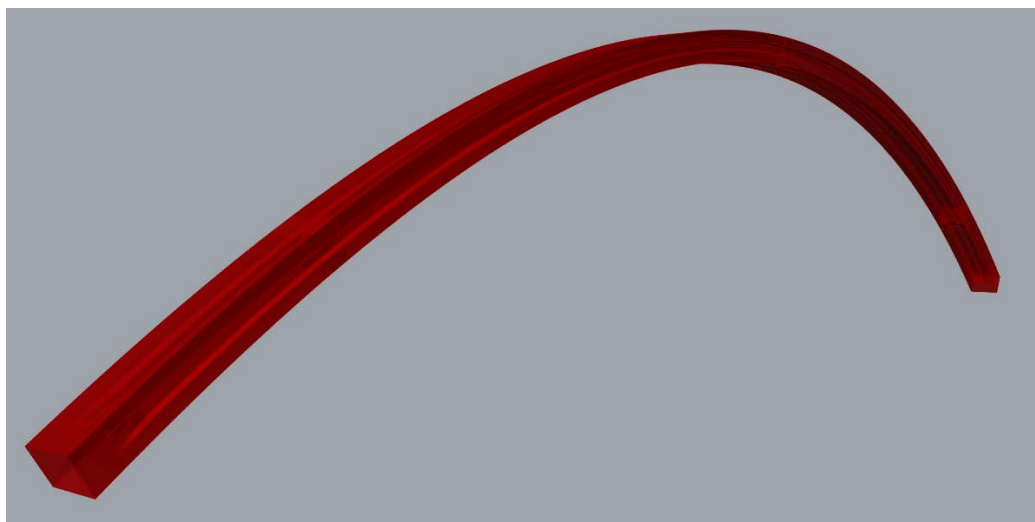


Figura 42. Modelización paramétrica. Modelización del arco del caso de estudio.

- Definición de la traviesa de apoyo:

Tras llevar a cabo la modelización de la directriz del arco, así como de las secciones que configuran el mismo, se procede a la modelización de la traviesa de apoyo. El proceso que se lleva a cabo, es análogo al desarrollado para la ejecución de la directriz del tablero y las secciones del mismo. La traviesa de apoyo se discretiza a lo largo de dos tramos fundamentales; siendo los mismos antes y después de la junta de calzada. Ante esta situación, antes de la junta de calzada recibirá las secciones de las pasarelas laterales, mientras que, después de la junta de calzada, recogerá la sección del tablero.

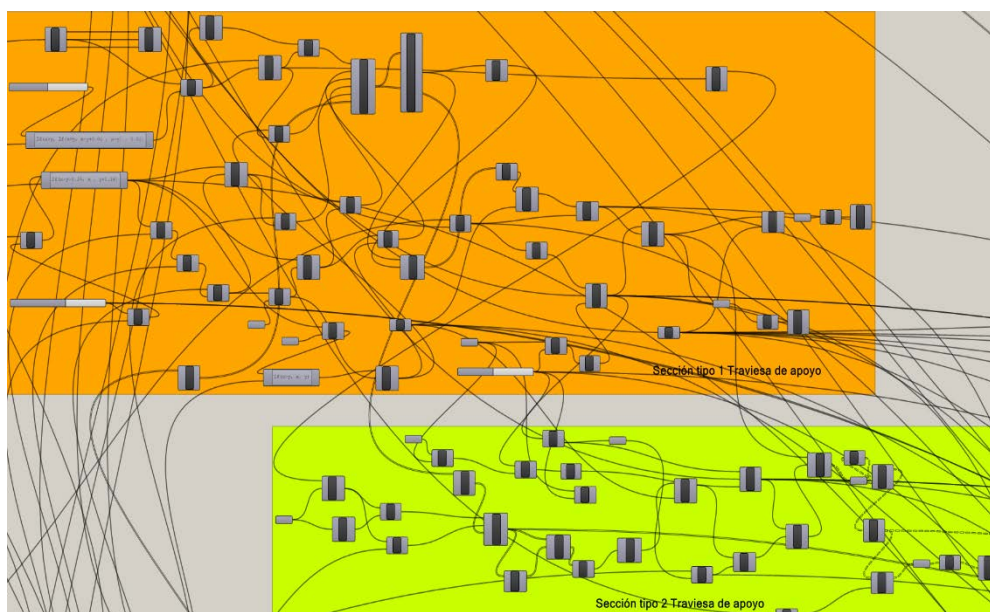


Figura 43. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de la traviesa de apoyo del caso de estudio.

En este caso, de la misma forma que se lleva a cabo en muchos otros elementos dentro del código desarrollado, para mantener la coherencia del modelo realizado, así como los resultados obtenidos del mismo, es necesario definir sentencias condicionales, las cuales supongan una dependencia entre el comienzo de la directriz del tablero y el fin de la travesía de apoyo. Si esto no se desarrollase e impusiese, podrían darse situaciones en las cuales la travesía se ubicase dentro del tablero, obteniendo un modelo erróneo. De la misma forma, dado que la travesía es un elemento que recogerá al tablero y a las pasarelas laterales, es necesario imponer que en ningún caso esta tenga un canto y un ancho inferiores a los de las propios elementos mencionados; para ello, se impondrá que el canto y el ancho de la travesía de apoyo sea como mínimo, mayor que el ancho y el canto del tablero y la pasarela lateral más un pequeño incremento.

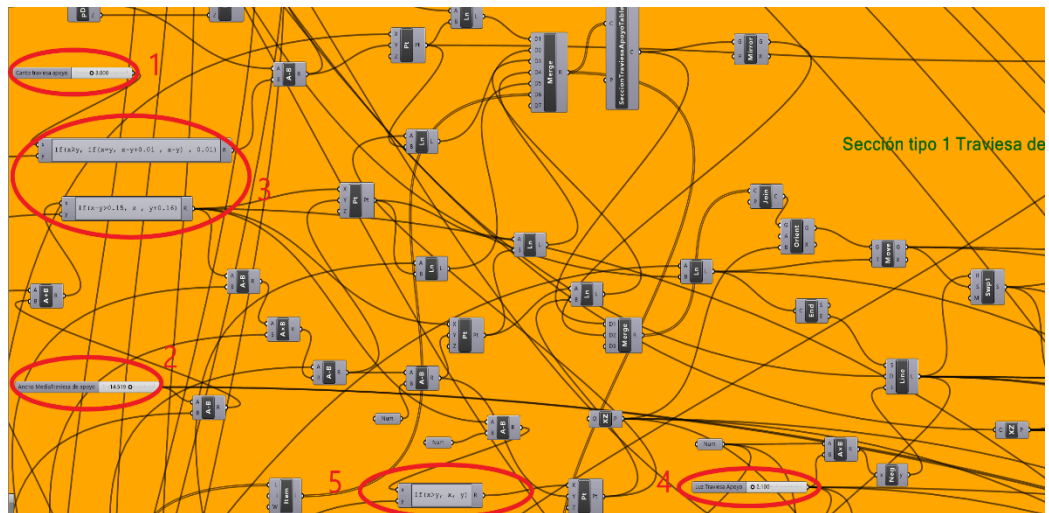


Figura 44. Modelización paramétrica. Sentencias condicionales a imponer en la travesía de apoyo con respecto y las pasarelas laterales.

- Conjunto 1. Definición variable del canto de la travesía de apoyo a definir por el usuario.
- Conjunto 2: Definición variable del ancho medio de la travesía de apoyo a definir por el usuario.
- Conjunto 3: Sentencias condicionales que garantizan que la sección de la travesía recoja, en cualquier situación, al tablero y las pasarelas laterales.
- Conjunto 4: Definición de la luz de la travesía de apoyo a definir por el usuario.
- Conjunto 5: Sentencia condicional que garantiza que la sección de la travesía de apoyo finalice en el punto en el que comienza el tablero.

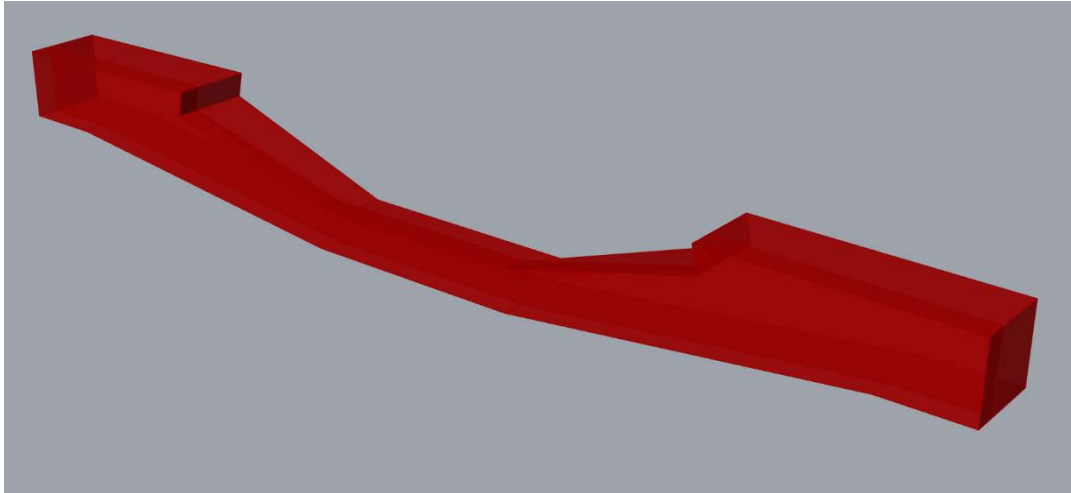


Figura 45. Modelización paramétrica. Modelización de la traviesa de apoyo del caso de estudio.

- Definición de las tornapuntas:

Una vez ha sido modelizada la traviesa de apoyo, se representarán las tornapuntas que nacen en la misma e intersecan con el tablero.

Para ello, se definirá, en primer lugar, la directriz que seguirán las tornapuntas. A lo largo de dicha directriz se establecerán los dominios de extensión de cada una de las secciones que forman las mismas. Una vez que haya sido generado el elemento tornapuntas, se realizará la intersección entre el sólido generado por el tablero y el sólido generado por las tornapuntas, con el fin de obtener el elemento definitivo.

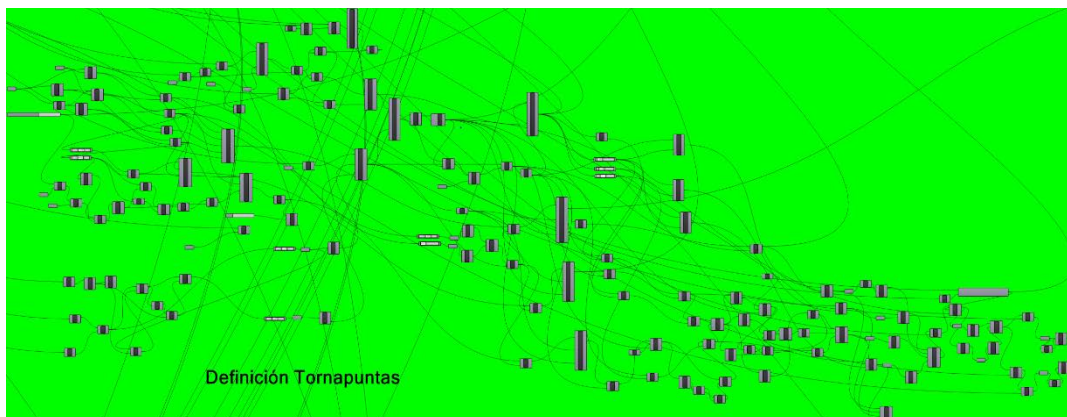


Figura 46. Modelización paramétrica. Detalle general de la modelización de las tornapuntas del caso de estudio.

Es necesario definir como variables de entrada para la representación de las tornapuntas, las posiciones medias de los extremos de la traviesa de apoyo, de tal forma que constituyan el punto central del eje que seguirá la directriz de las mismas. A su vez, como variable de entrada se precisará al usuario definir el ancho de las tornapuntas, el cual, nuevamente mediante sentencias condicionales se programará para que no sobrepase los límites de las partes exteriores de la traviesa de apoyo. Esta limitación permitirá, posteriormente, que la posición del nudo de arranque de los pies inclinados sea acorde con el resto de elementos que confluyen en ese punto del modelo.

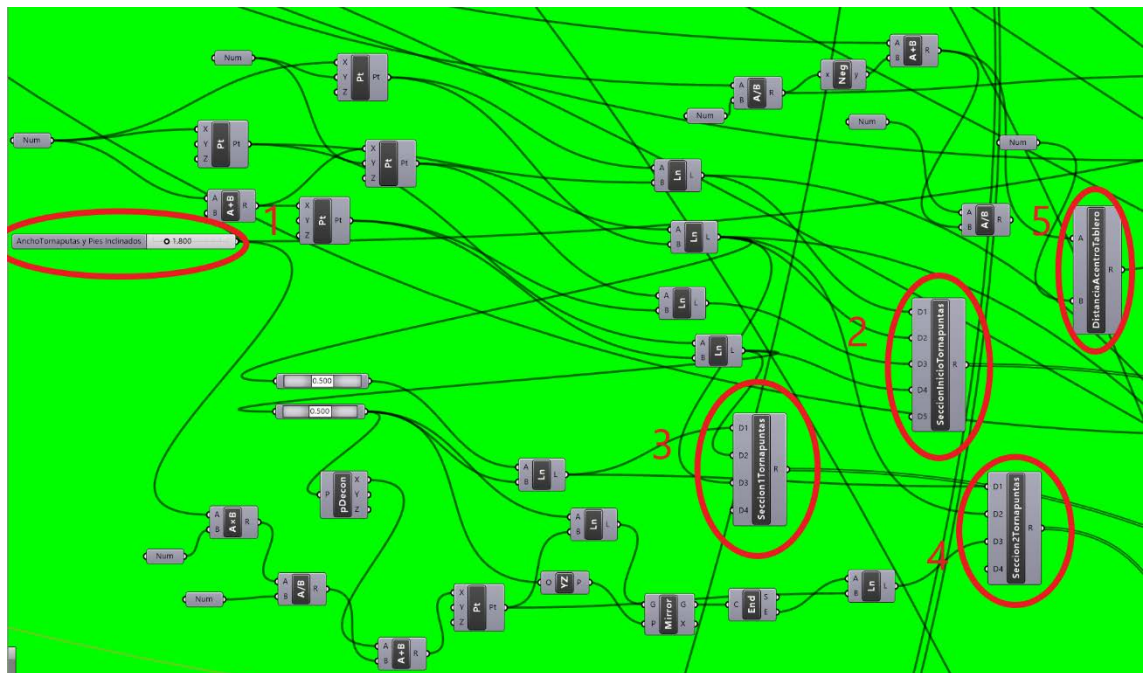


Figura 47. Modelización paramétrica. Generación de las secciones transversales que compondrán las tornapuntas.

- Conjunto 1: Definición variable del ancho de las tornapuntas a definir por el usuario.
- Conjunto 2: Representación de la sección de inicio de las tornapuntas.
- Conjunto 3: Representación de la sección intermedia de las tornapuntas.
- Conjunto 4: Representación de la sección final de las tornapuntas.
- Conjunto 5: Línea que determinará la intersección entre la directriz de las tornapuntas y la directriz del tablero.

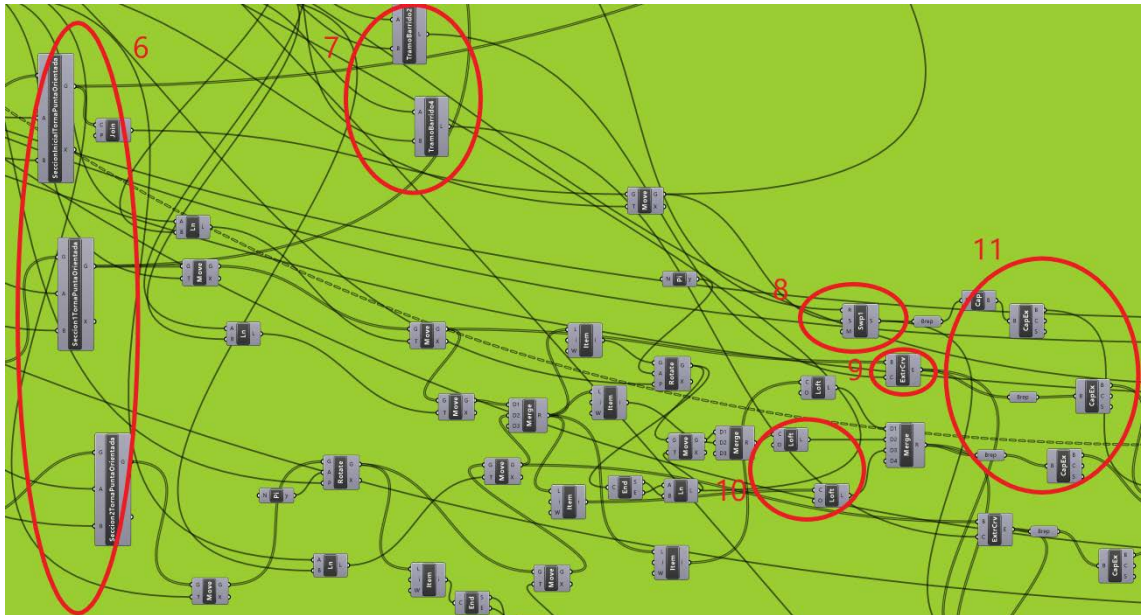


Figura 48. Modelización paramétrica. Generación del sólido que compondrá las tornapuntas.

- Conjunto 6: Secciones de las tornapuntas orientadas en el plano XZ según la directriz de las mismas.
- Conjunto 7: Dominios de extensión para la representación de los sólidos de las distintas secciones de las tornapuntas.
- Conjunto 8: Generación de las trayectorias de la sección intermedia.
- Conjunto 9: Generación de las trayectorias de la sección de inicio.
- Conjunto 10: Generación de los elementos de transición entre la sección de inicio y la sección intermedia, y de la sección intermedia y la sección final, respectivamente. Solevación.
- Conjunto 11: Generación del sólido que configurará las tornapuntas.

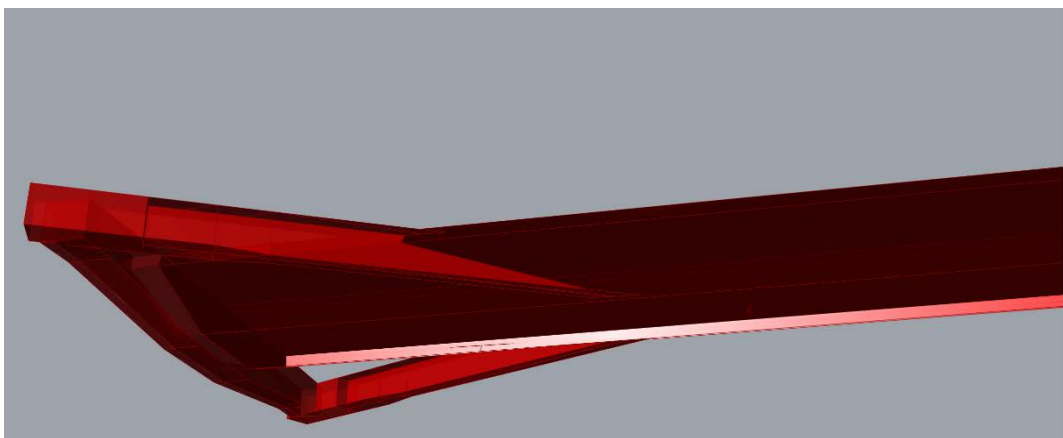


Figura 49. Modelización paramétrica. Modelización de las tornapuntas del caso de estudio.

- **Definición del nudo de arranque de los pies inclinados:**

Para la realización del nudo de arranque, el cual supondrá el inicio de los pies inclinados, es necesario enviar como variable de entrada el ancho de las tornapuntas, el cual está ligado con el ancho de los pies inclinados. Para su modelización, se procede a representar la sección del nudo de arranque, y su posterior extensión a lo largo del extremo de la traviesa de apoyo. El canto que el usuario le proporcione a la sección del nudo de arranque, representará la pendiente que tendrán, posteriormente, los pies inclinados. El proceso de modelización no presenta ninguna particularidad, siendo análogo a lo realizado con anterioridad.

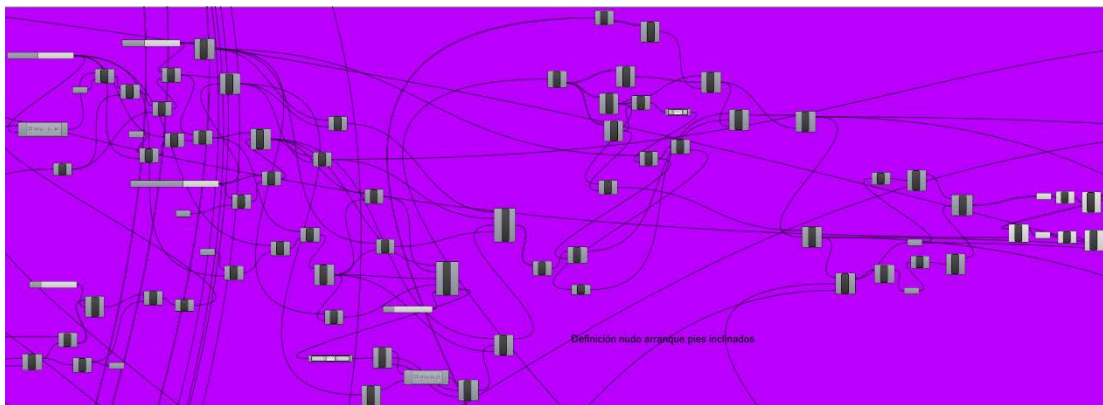


Figura 50. Modelización paramétrica. Detalle general del nudo de arranque de los pies inclinados.

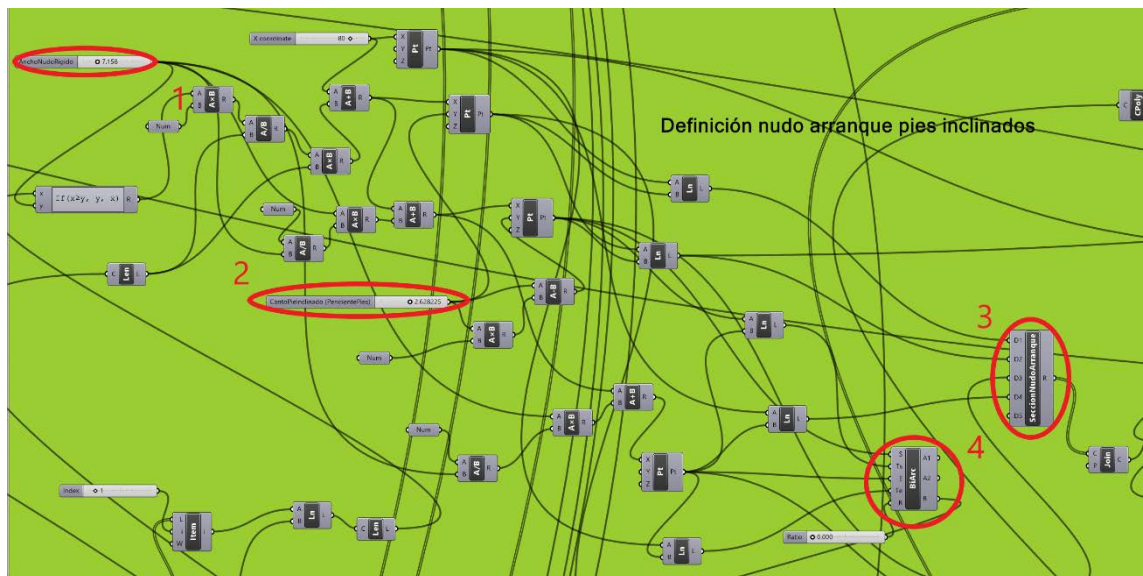


Figura 51. Modelización paramétrica. Definición del nudo de arranque de los pies inclinados.

- Conjunto 1: Definición variable del ancho del nudo de arranque a definir por el usuario.

- Conjunto 2: Definición variable del canto del nudo de arranque a definir por el usuario. Cabe destacar que supondrá, posteriormente, la pendiente de los pies inclinados.
- Conjunto 3: Determinación del arco que configura la sección del nudo de arranque.
- Conjunto 4: Sección del nudo de arranque generada.

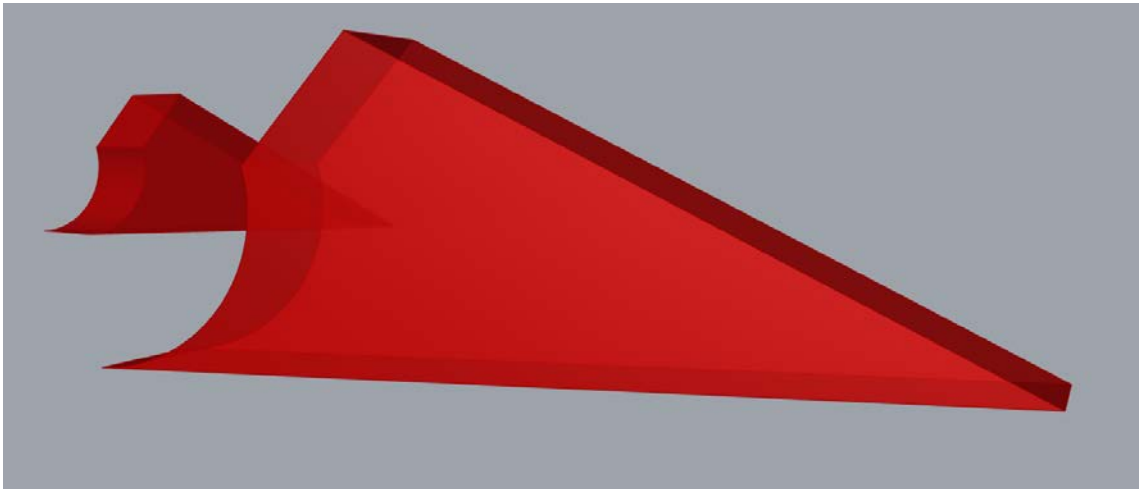


Figura 52. Modelización paramétrica. Modelización del nudo de arranque de los pies inclinados de la situación de estudio.

- Definición de los pies inclinados:

Antes de terminar de cerrar y constituir el modelo que se ha parametrizado, es necesario modelizar los pies inclinados. Su programación, ha supuesto un gran esfuerzo, ya que conforme se van modelizando los elementos que constituyen el modelo, las dependencias y relaciones que surgen entre los mismos van “*in crescendo*”. Tal y como se ha detallado con anterioridad, se ha relacionado el ancho de las tornapuntas, con el ancho de los extremos de las traviesas de apoyo; de esta forma, cuando se cambia la geometría de uno ellos, con respecto al otro, dicho elemento le acompaña de forma adecuada, obteniendo de esta forma modelos sólidos y coherentes. A su vez, dicho ancho también estará relacionado con el ancho de los pies inclinados, y siempre que se produzca un cambio en cada uno de los mismos, que pudiese dar lugar a cualquier tipo de incompatibilidad geométrica, el resto de elementos se acomodarán a la nueva situación. Los pies inclinados, como se ha descrito en el Capítulo 2, están formados por dos secciones tipo, así como por las secciones de transición entre las mismas. Su modelización, debido a los surcos profundos, sigue un procedimiento similar al que ha sido llevado a cabo para modelizar el arco. No obstante, en esta situación, la modelización no lleva asociada esa componente de complejidad que

- Conjunto 1: Representación de la sección tipo 2 de los pies inclinados.
- Conjunto 2: Definición de sección abierta, a partir de la sección tipo 2, para la generación del surco dentro del nudo de arranque.
- Conjunto 3: Definición de sección abierta, a partir de la sección tipo 1, para la generación del surco dentro del nudo de arranque.

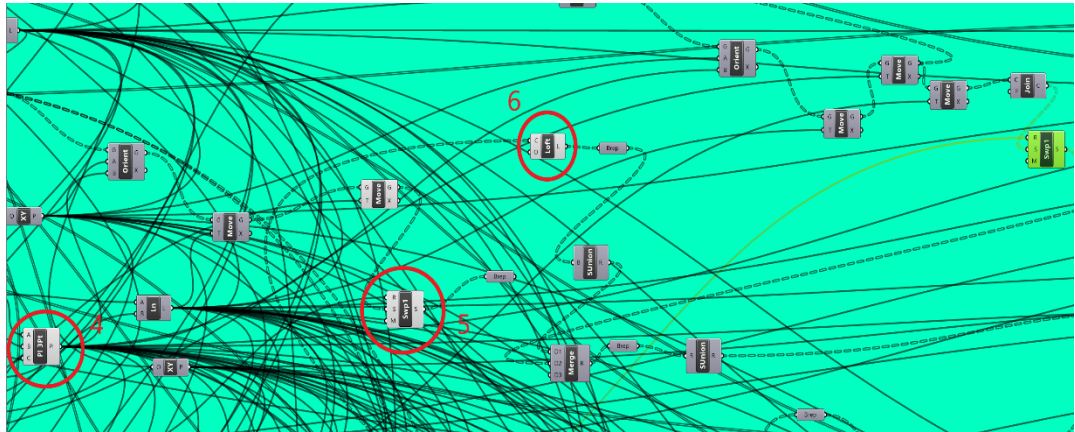


Figura 55. Modelización paramétrica. Representación de la parte intermedia y de la parte final de los pies inclinados.

- Conjunto 4: Planos perpendiculares a la sección del nudo de arranque del nudo rígido. Necesidad de definición para alojar en su interior las secciones abiertas que formarán los surcos profundos.
- Conjunto 5: Generación de trayectorias de la parte intermedia del arco. Sección tipo 2.
- Conjunto 6: Generación de la parte final de los pies inclinados. Sección previa a los nudos de enlace y unión entre los pies inclinados y el arco.

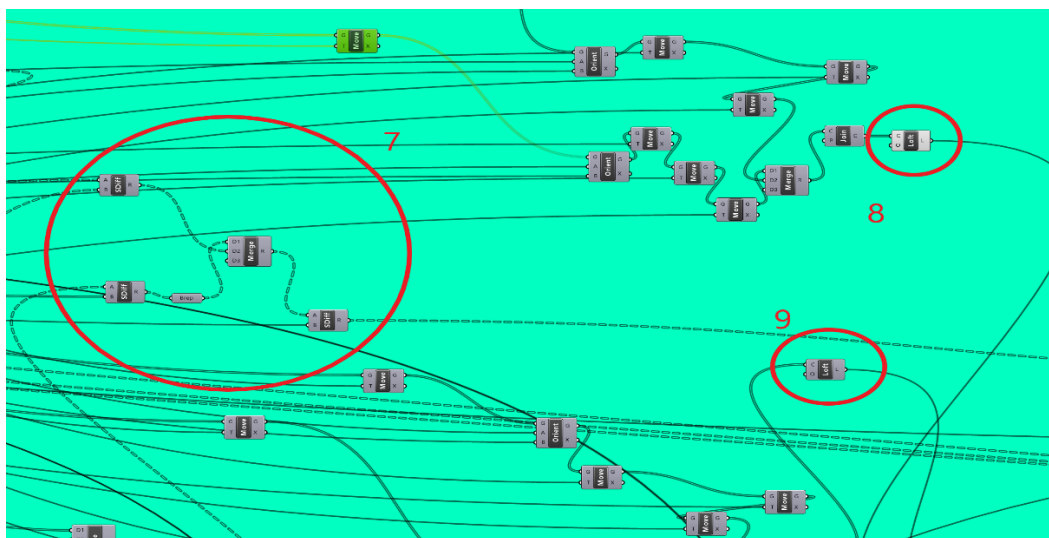


Figura 56. Modelización paramétrica. Representación de secciones de transición entre las secciones tipo. Constitución de surcos.

- Conjunto 7: Modelización de los surcos profundos. Sólido generado por diferencia y unión de las secciones abiertas alojadas en el interior del nudo de arranque y el propio nudo.
- Conjunto 8: Sección de transición generada a partir de la sección tipo 1 y la sección tipo 2, respectivamente, al inicio de los pies inclinados.
- Conjunto 9: Sección de transición generada a partir de la sección tipo 2 y la sección tipo 1, respectivamente, al final de los pies inclinados.

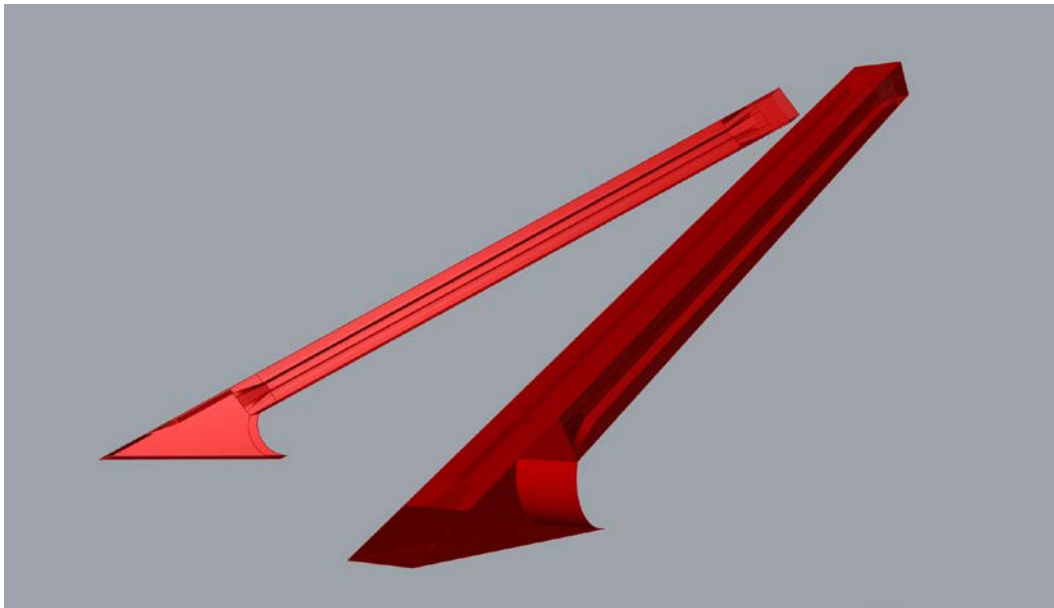


Figura 57. Modelización paramétrica. Modelización de los pies inclinados del caso de estudio. Detalle de los surcos profundos tanto en el inicio, como en el fin de los pies inclinados.

- Definición del nudo de enlace:

Para cerrar el modelo, se modelizará el nudo de enlace entre el arco y los pies inclinados. De forma análoga al proceso seguido para modelizarlo mediante AutoCAD 3D en el Capítulo 2, se materializará el sólido conformado por los planos existentes entre las caras exteriores de los puntos finales de los pies inclinados y las caras exteriores de los puntos iniciales de los arcos. Este procedimiento, tiene la ventaja de que, al estar configurado el sólido en cuestión, por los planos que generan las secciones definidas, así como por los planos definidos entre las mismas, la posición del nudo rígido siempre será variable, ya sea porque se produzca una variación de longitud o de sección en los pies inclinados, una variación en el arco de la directriz y sus secciones, o porque de forma indirecta, debido a la dependencia entre elementos, la variación de uno de los elementos haga que el otro elemento tenga que acompañarle para

generar un modelo coherente. Nótese que, para poder llevar a cabo su modelización, este procedimiento ha de recibir, como variables de entrada las secciones finales de los pies inclinados, así como las secciones iniciales del arco.

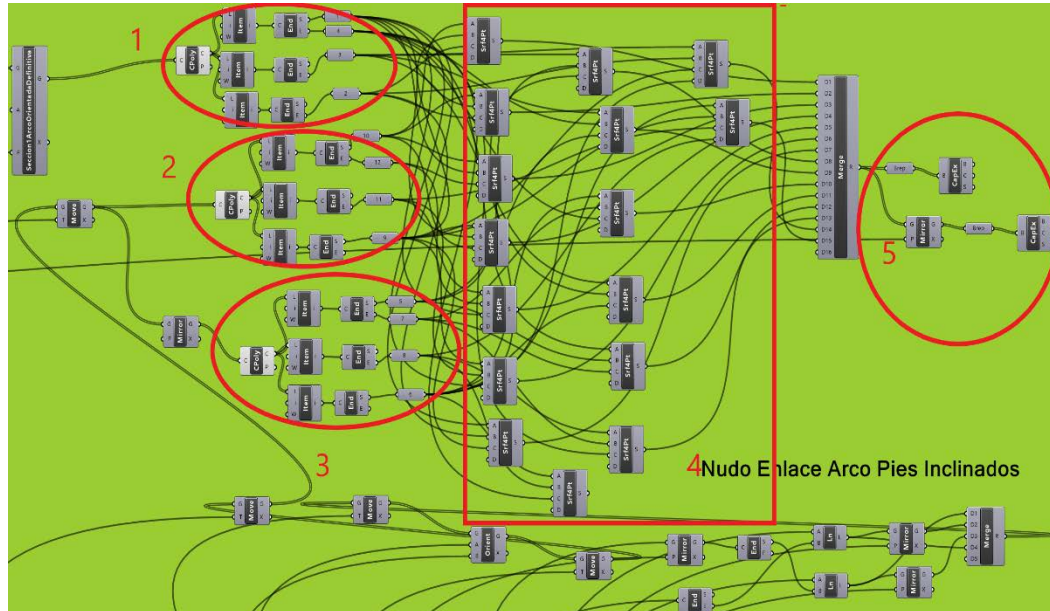


Figura 58. Modelización paramétrica. Generación del sólido que conformará el nudo de enlace entre los pies inclinados y el arco.

- Conjunto 1: Puntos que configuran la sección de inicio del arco.
- Conjunto 2: Puntos que configuran la sección del pie inclinado derecho.
- Conjunto 3: Puntos que configuran la sección del pie inclinado izquierdo.
- Conjunto 4: Planos formados a partir, de los elementos definidos en los Conjuntos 1,2 y 3.
- Conjunto 5: Generación del sólido que conformará el nudo de enlace entre los pies inclinados y el arco.

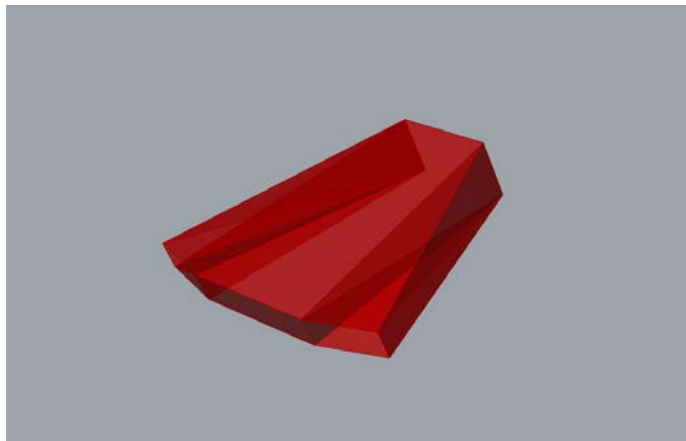


Figura 59. Modelización paramétrica. Nudo de enlace entre pies inclinados y arco de la situación de estudio.

- **Definición de los apoyos verticales:**

Una vez se ha cerrado el conjunto del modelo, y las dependencias han sido relacionadas unas con respecto de las otras, se modelizarán los apoyos verticales sobre los que descansa la traviesa de apoyo. Para su modelización el proceso es análogo a la modelización de otros elementos del modelo, teniendo en cuenta nuevamente, la presencia de surcos profundos en los mismos, por lo que será necesario generar secciones que supongan la transición entre las existentes. Cabe destacar que, dicha situación está modelizada de tal forma que, se permite variar las condiciones geométricas de los aparatos de apoyo a disponer.

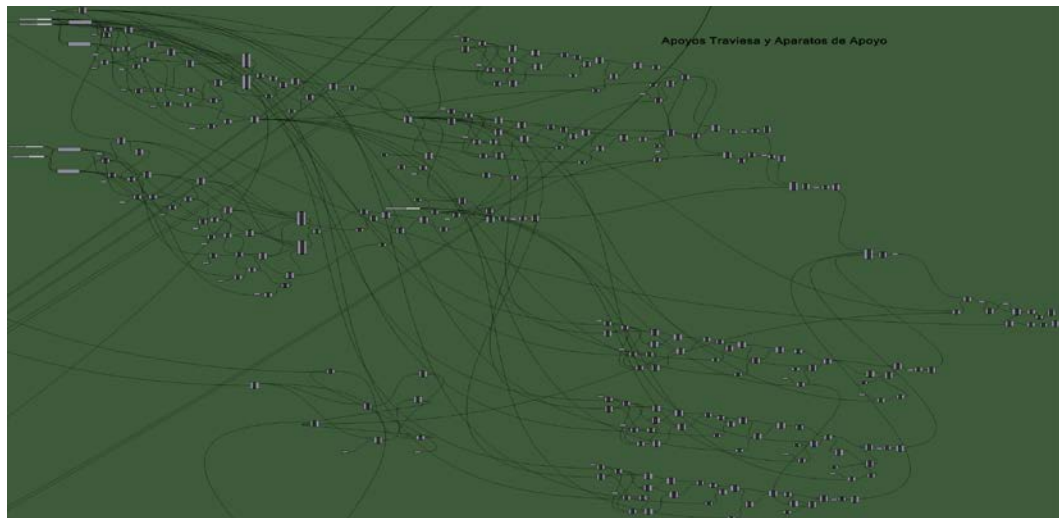


Figura 60. Modelización paramétrica. Detalle general de los apoyos verticales y los aparatos de apoyo de la situación de estudio.

Teniendo en cuenta que, se trata de un proceso analizado y descrito con anterioridad, el cual no contempla ni incluye nuevos procedimientos, se incluyen los resultados obtenidos a partir de su modelización.



Figura 61. Modelización paramétrica. Modelización de los apoyos verticales y los aparatos de apoyo de la situación de estudio.

- Definición de las péndolas:

Para terminar definitivamente el modelo paramétrico, se modelizarán las péndolas que sirven de elemento de cuelgue del tablero. Con el fin de que éstas sean variables, el usuario puede definir el número de péndolas a disponer, así como el radio de las mismas. De esta forma, el número de péndolas a introducir, se traducirá como un número de divisiones de la directriz del arco, y como un número de divisiones de la directriz del tablero; por consiguiente, las líneas que unirán, correlativamente, los puntos obtenidos, conformarán, las péndolas del modelo realizado.

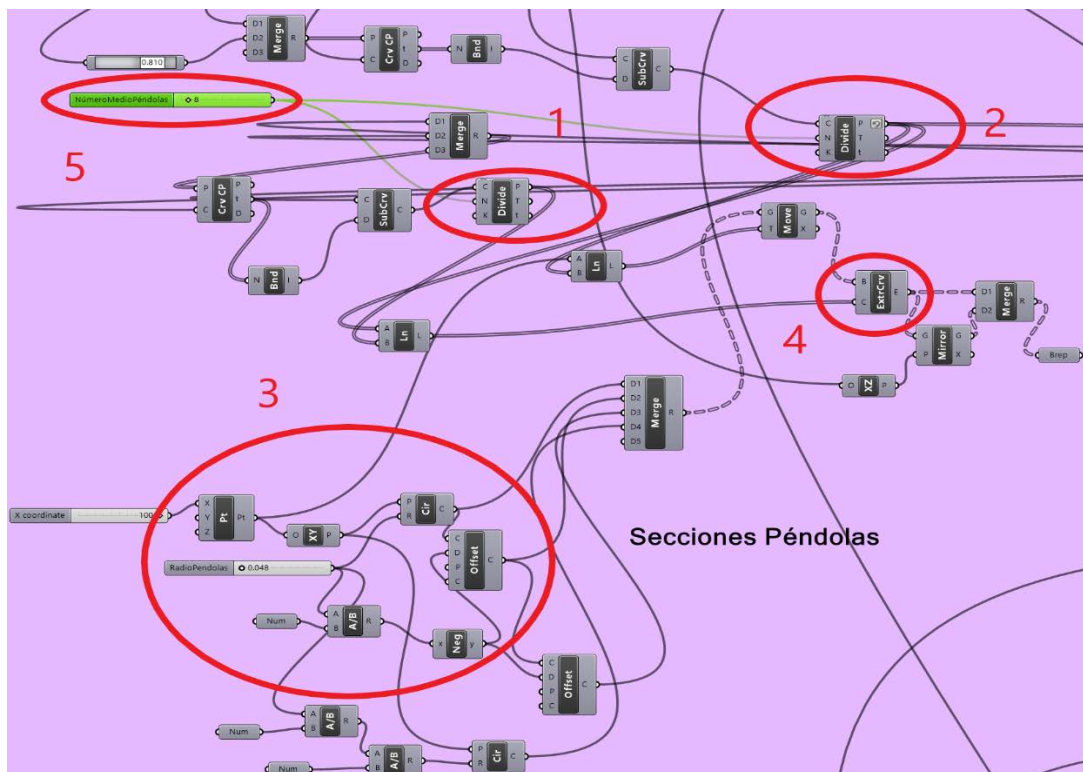


Figura 62. Modelización paramétrica. Detalle de la parametrización de las péndolas.

- Conjunto 1: Divisiones a realizar en la directriz del tablero. Requiere la variable de entrada del número de péndolas, establecida previamente por el usuario.
- Conjunto 2: Divisiones a realizar en la directriz del arco. Requiere la variable de entrada del número de péndolas, establecida previamente por el usuario.
- Conjunto 3: Sección de las péndolas en función del radio a definir por el usuario
- Conjunto 4: Generación del modelo de las péndolas.
- Conjunto 5: Variación del número de péndolas a introducir por el usuario.

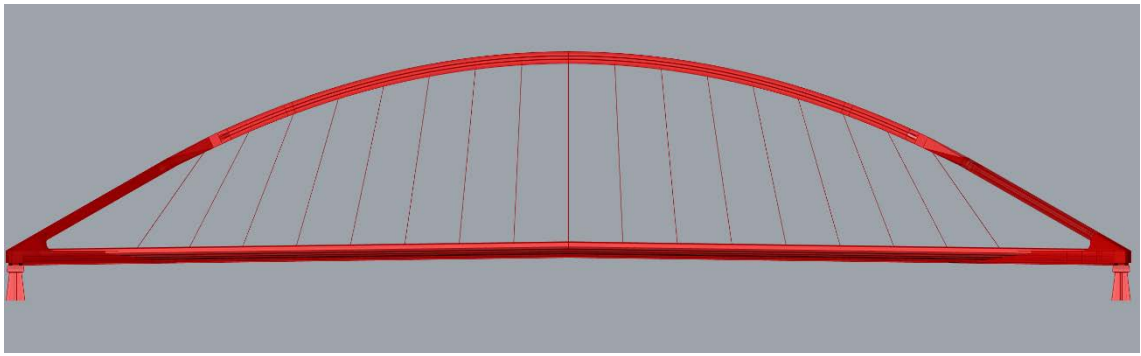


Figura 63. Modelización paramétrica. Modelización de las péndolas del caso de estudio.

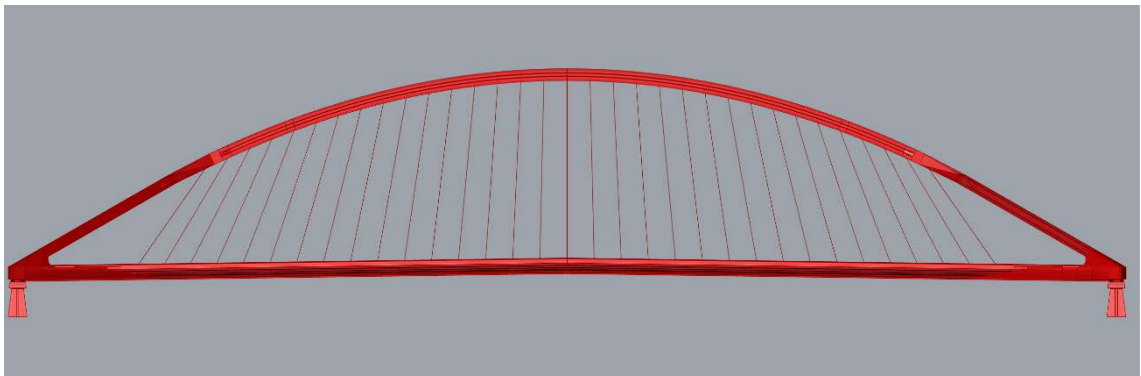


Figura 64. Modelización paramétrica. Variación de las péndolas modelizadas en la situación inicial. 32 péndolas.

CAPÍTULO 4. MODELO DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO

Tras realizar el modelo paramétrico en el Capítulo 3, se presenta una combinación de situaciones geométricas muy extensa a determinar. Debido a la comunicación entre las bases de datos que implementa la metodología BIM, tal y como se recoge en el Capítulo 1 de este trabajo de fin de máster, es posible traducir y enviar esa información de manera comprensible a otras herramientas computacionales que puedan aprovechar dicha información para llevar a cabo cálculos o análisis de diversos tipos. No obstante, para la realización del modelo de cálculo, se va a emplear la herramienta de análisis paramétrico estructural Karamba 3D; teniendo en cuenta que dicha herramienta, trabaja en el entorno de Grasshopper, la comunicación del modelo paramétrico desarrollado es inmediata. De esta forma, la programación previa del modelo paramétrico, permite transmitir de forma automática cualquier combinación estructural posible, para posteriormente ser analizada mediante Karamba 3D. Independientemente de ello, tal y como se comenta al comienzo del Capítulo 3, existe una limitación, ya que Karamba 3D solo permite asignar a los diversos elementos que componen la estructura, secciones tipificadas y estandarizadas, lo cual para el caso de estudio no resulta de utilidad. Teniendo en cuenta esto, surge la necesidad de buscar una solución alternativa para poder asignar a los elementos estructurales las secciones transversales que los componen, y poder aprovechar tanto las combinaciones geométricas que proporciona la modelización paramétrica como los modelos de cálculo asociados a dichas combinaciones. Para ello, se definirá completamente, tal y como se detallará a continuación, el modelo de cálculo generado por Karamba 3D a partir del modelo paramétrico realizado en Grasshopper. En dicho modelo se convertirán las barras en vigas, se definirán las condiciones de rigidez de los elementos estructurales que componen el modelo y se establecerán las condiciones de apoyo. Posteriormente, a partir de la interoperabilidad mencionada entre herramientas computacionales, se generará un archivo tipo “.IFC”, el cual, tal y como se detalla en el Capítulo 5, se implementará en SAP2000, donde se definirán las características de los materiales, las secciones transversales de los elementos que componen la estructura y los estados de carga a analizar.

Para generar el modelo de cálculo en Karamba 3D, se van a emplear las distintas directrices que configuran los elementos en el modelo paramétrico, de tal forma que, sea posible asignar, de forma inmediata, posteriormente las secciones transversales con respecto a su centro de gravedad. Cada una de las barras que compondrán el modelo de cálculo, se discretizará en función de la sección transversal que las constituyen.

Procediendo de forma análoga a lo llevado a cabo en los capítulos anteriores, se definirá en detalle el procedimiento para generar el modelo de cálculo mediante Karamba 3D, así como el proceso de conversión de los elementos del modelo en vigas y la determinación de las condiciones de apoyo.

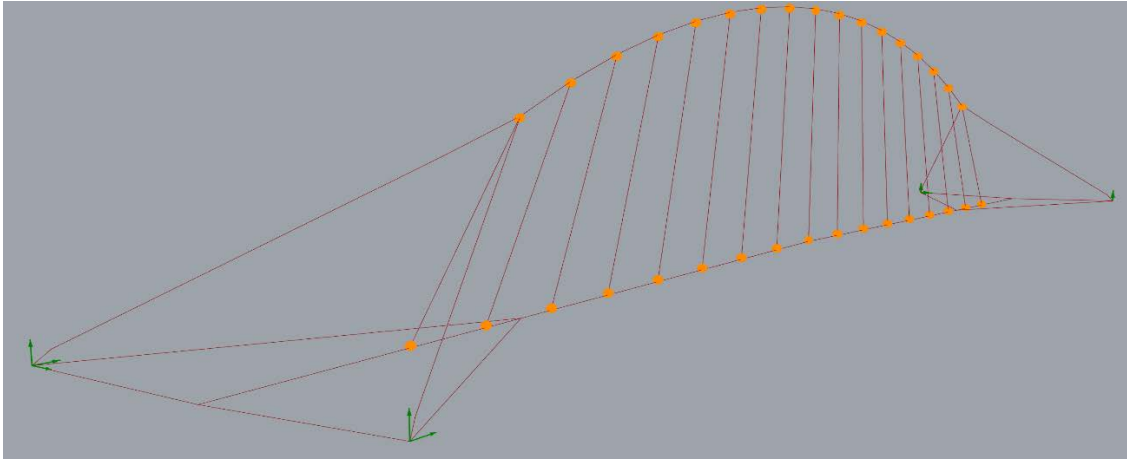


Figura 65. Modelo de cálculo resultante mediante Karamba 3D.

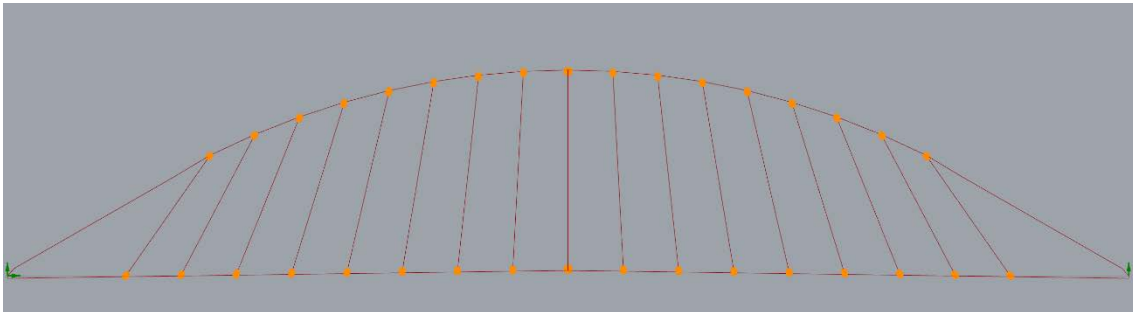


Figura 66. Modelo de cálculo resultante mediante Karamba 3D. Alzado.

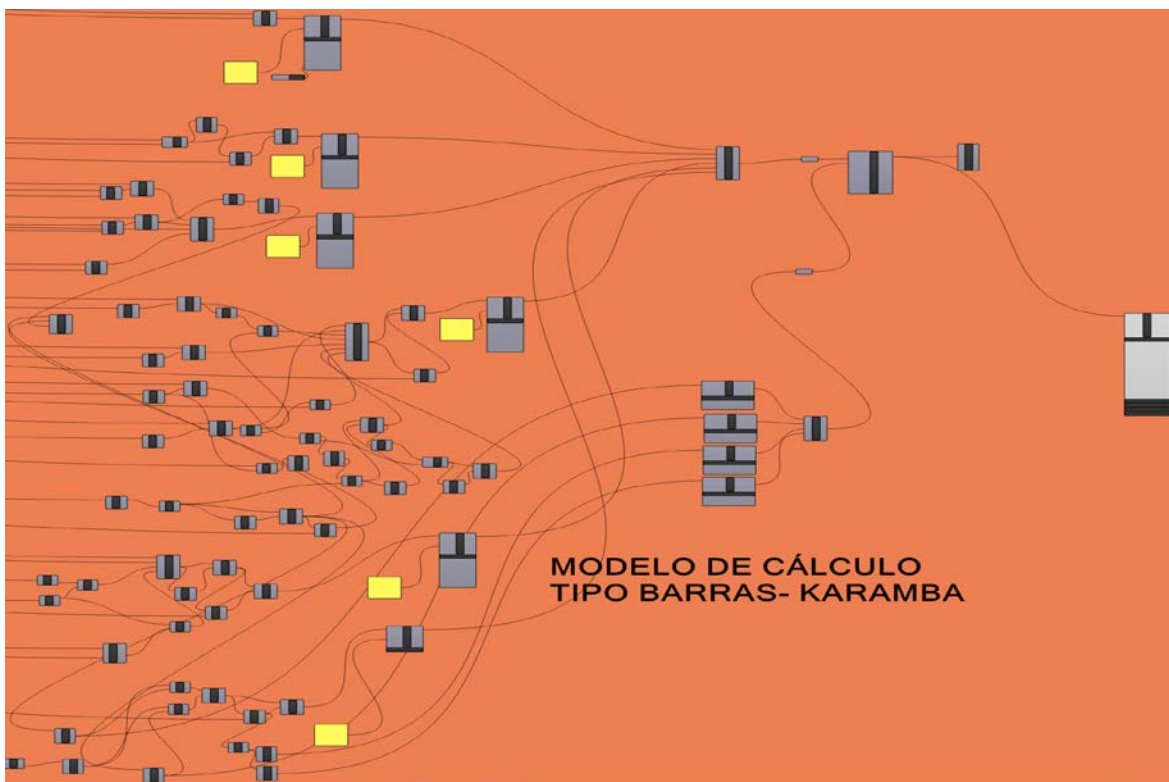


Figura 67. Modelo de cálculo programado mediante Karamba 3D.

- **Elementos que configuran el arco en el modelo de cálculo:**

En primer lugar, se determinarán los elementos del arco que formarán parte del modelo de cálculo. Para ello, se toman los elementos que se encuentran entre los puntos obtenidos de la directriz del arco mediante modelización paramétrica. Una vez elegidos los elementos que compondrán el arco en el modelo de cálculo, es preciso convertir esos elementos en tipo viga y definir si presentan rigidez a flexión.

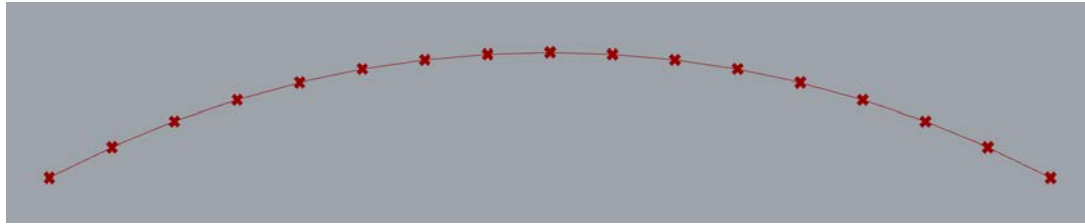


Figura 68. Elementos que configuran el arco del modelo de cálculo.

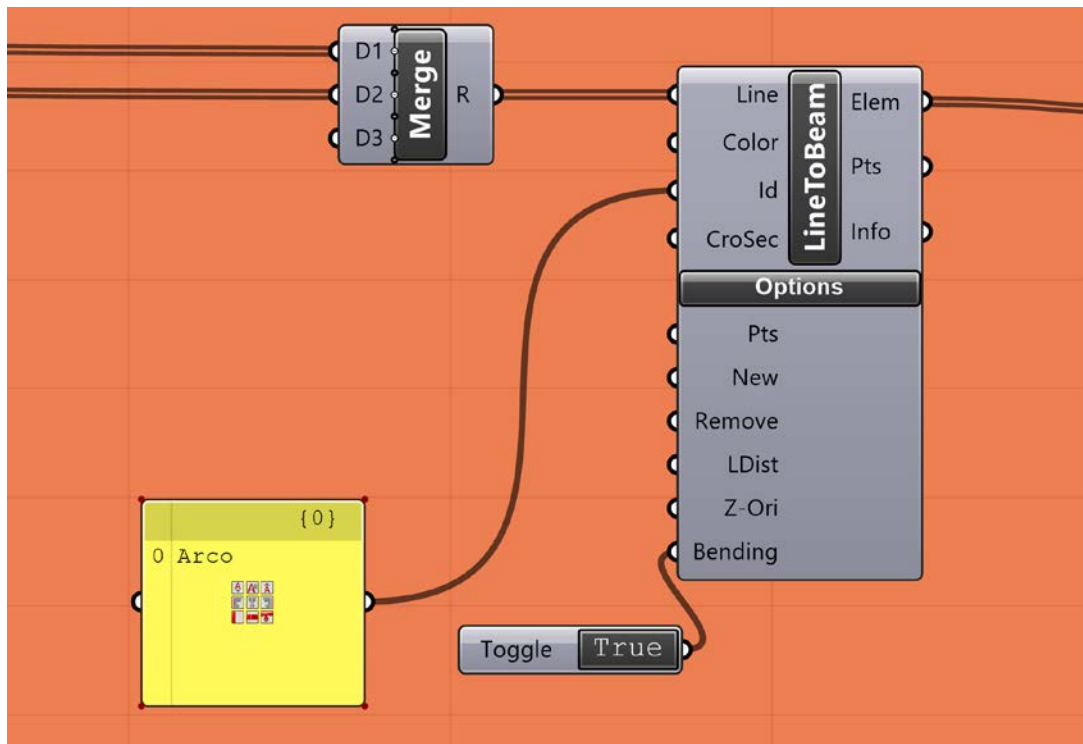


Figura 69. Conversión de los elementos que forman la directriz del arco en vigas.

De esta forma, el arco se discretiza en 16 elementos, de los cuales, los doce centrales tienen asociada la sección tipo 5 del arco, los dos extremos del arco, tienen asociada la sección tipo 1 del arco, y los 2 comprendidos entre los anteriores, tienen asociada la sección tipo 3 del arco.

Con carácter general, todos los elementos que componen el modelo de cálculo presentarán rigidez a flexión, excepto las péndolas, en las cuales, se anulará en su parte correspondiente.

- **Elementos que configuran el tablero en el modelo de cálculo:**

De la misma forma, el tablero se discretizará en función de las secciones transversales que lleve asociadas; la asignación completa de las diversas secciones a los distintos componentes del modelo, se realizará en detalle en el Capítulo 5. Por lo tanto, el tablero se discretizará en 6 elementos, cuatro de ellos asociados a la sección del tablero y dos de ellos asociados a la sección de las pasarelas laterales, las cuales son recogidas, junto con el tablero, a partir de la traviesa de apoyo.

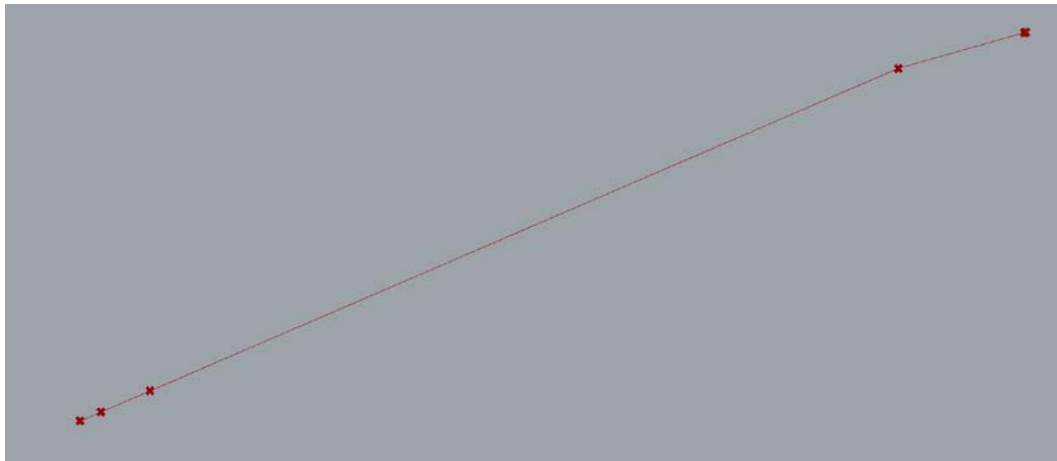


Figura 70. Elementos que configuran el tablero del modelo de cálculo.

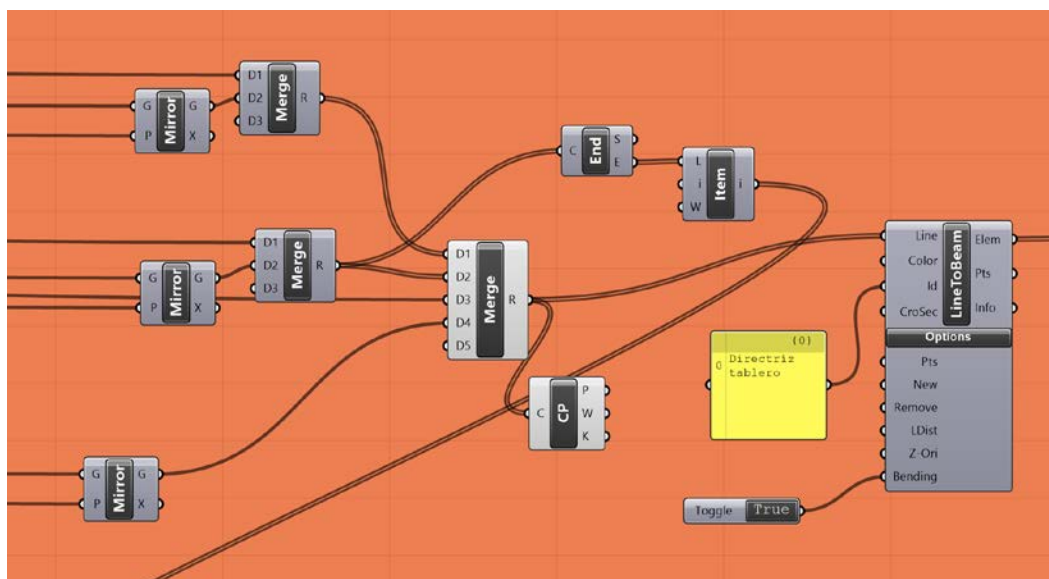


Figura 71. Conversión de los elementos que forman la directriz del arco en vigas.

- **Elementos que configuran las péndolas en el modelo de cálculo:**

Para definir el modelo de cálculo, se asignan las 16 péndolas modelizadas mediante modelización paramétrica. Es preciso, anular la rigidez a flexión de las mismas para obtener resultados coherentes en el cálculo que se llevará a cabo en el Capítulo 5.

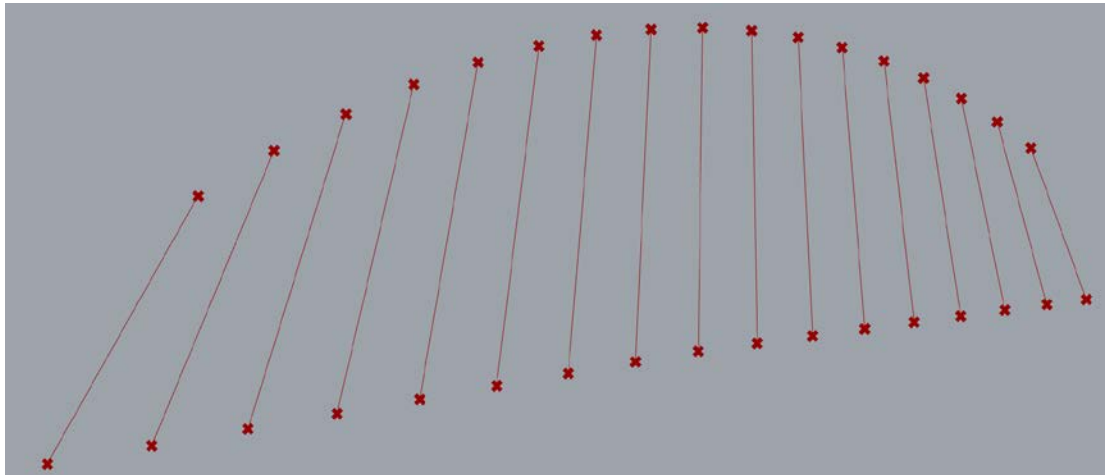


Figura 72. Elementos que configuran las péndolas en el modelo de cálculo.

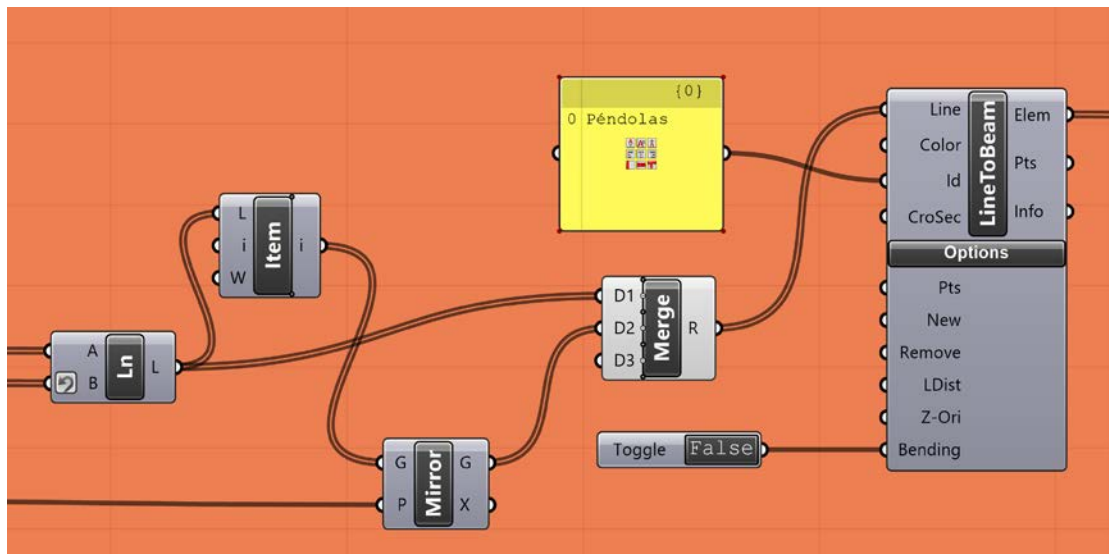


Figura 73. Conversión de los elementos que forman las péndolas del arco en vigas, anulando previamente la rigidez a flexión.

- **Elementos que configuran los pies inclinados en el modelo de cálculo:**

Para constituir los pies inclinados en el modelo de cálculo, se realiza una discretización en 28 elementos, 7 de ellos asociados a cada uno de los pies inclinados. Los puntos iniciales, llevan asignados la sección de los

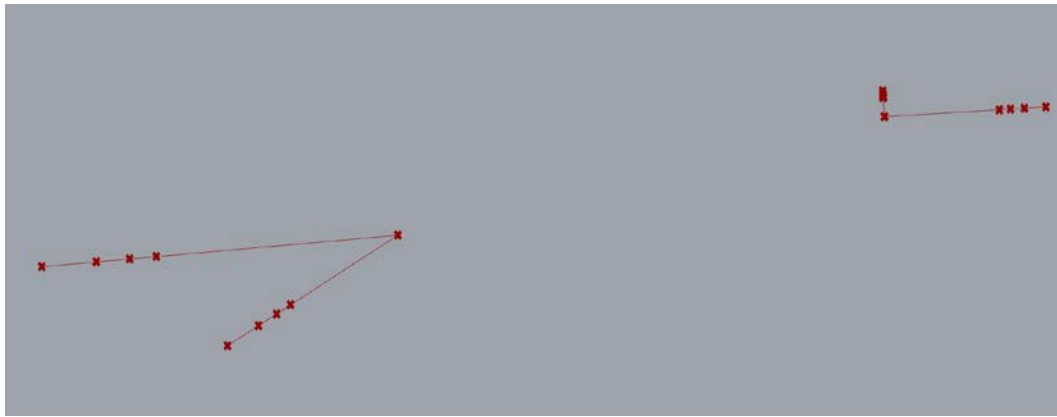


Figura 76. Elementos que configuran las tornapuntas en el modelo de cálculo.

De esta forma, las tornapuntas están constituidas por 16 elementos en el modelo de cálculo, 4 de ellos asociados a cada una de ellas. Al primer elemento, se le asignará la sección tipo inicial de las tornapuntas, al segundo elemento, se le asigna la sección tipo 1 de las tornapuntas, mientras que, a los dos elementos restantes, se les asocia la sección tipo 2 de las mismas.

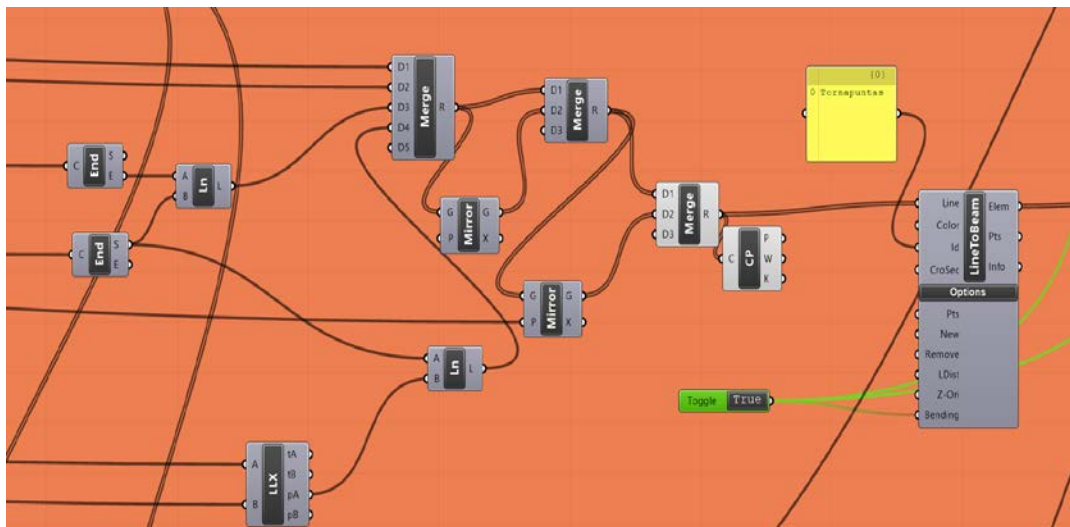


Figura 77. Conversión de los elementos que forman las tornapuntas del puente en vigas.

- **Elementos que configuran las traviesas de apoyo en el modelo de cálculo:**

Finalmente, los últimos elementos que configurarán y completarán el modelo de cálculo, serán las directrices de las tornapuntas. Cabe destacar que, como se define en el Capítulo 5, debido a la variación de la sección de las mismas en sentido transversal, surge la necesidad de determinar una sección equivalente simplificada de la misma área. Las traviesas de apoyo configurarán las barras de unión del tablero con los apoyos.

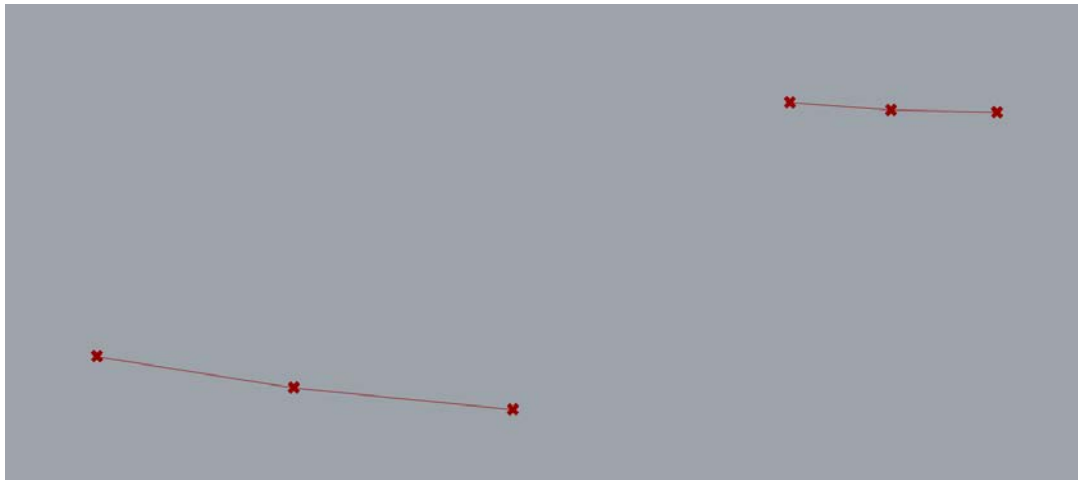


Figura 78. Elementos que configuran las traviesas de apoyo en el modelo de cálculo.

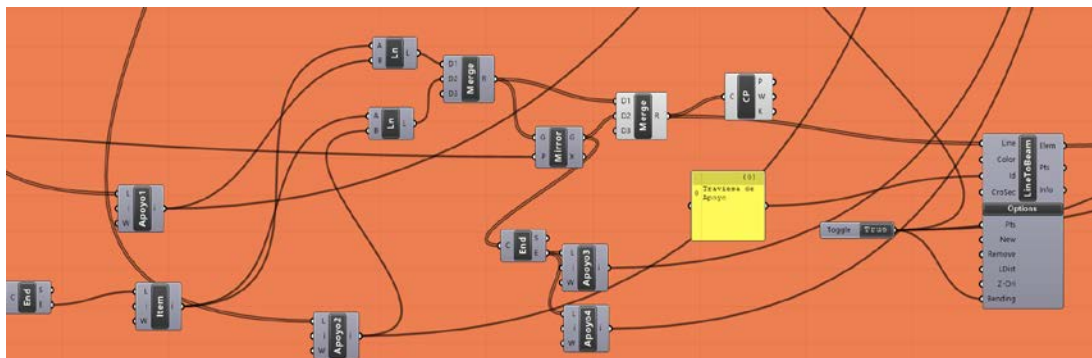


Figura 79. Conversión de los elementos que forman las traviesas de apoyo del puente en vigas.

- Condiciones de apoyo impuestas:

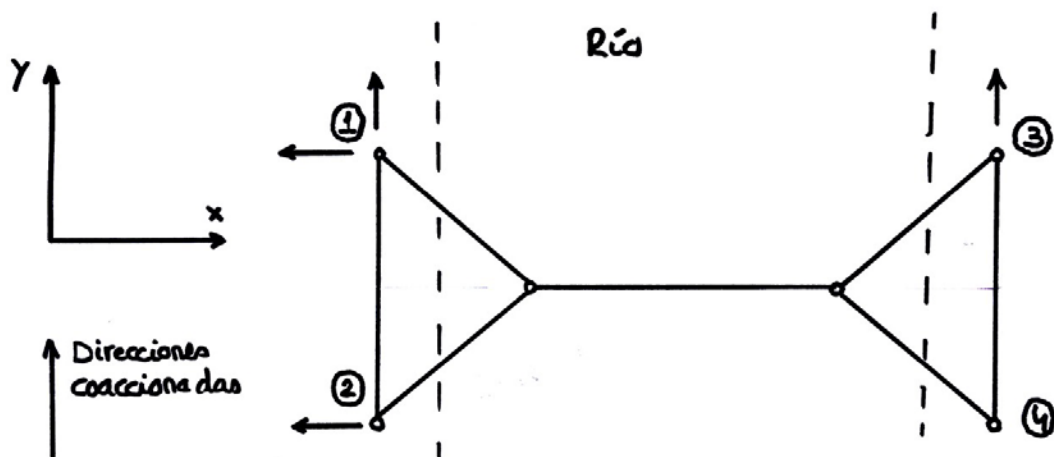


Figura 80. Esquema de las condiciones de apoyo impuestas.

La disposición dispuesta de apoyos para la configuración del modelo, consiste en coaccionar el apoyo 1, tanto en sentido longitudinal como transversal. Por otro lado, el apoyo 2 estará coaccionado únicamente en sentido longitudinal. Finalmente, el apoyo 3 se coaccionará transversalmente y el apoyo 4 quedará liberado; esta combinación de apoyos, se persigue dejar libre el apoyo número 4, debido a posibles fenómenos de carácter térmicos, consiguiendo, a su vez, incluso en uno de los apoyos, impedir el giro.

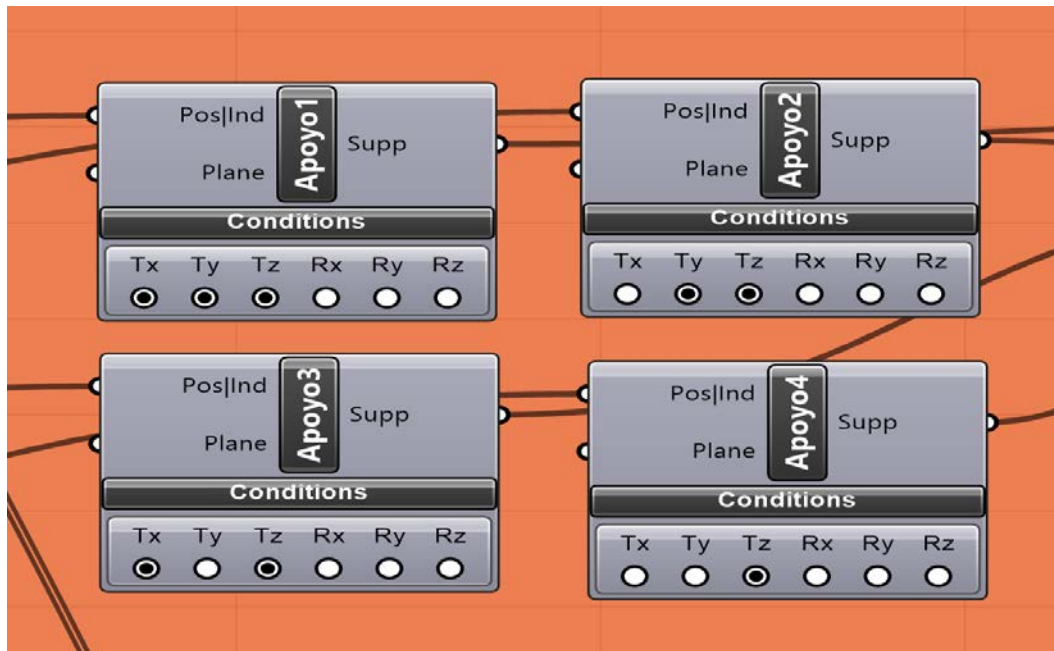


Figura 81. Definición de los apoyos, conforme al esquema dispuesto, del modelo de cálculo.

Una vez que han sido definidas las barras que constituirán el modelo de cálculo, así como las condiciones de apoyo que permitirán analizar el comportamiento del mismo, se genera el modelo de cálculo. Una vez que dicho modelo ha sido generado, será exportado, tal y como se ha descrito anteriormente, en un lenguaje comprensible para que la herramienta SAP2000 pueda interpretarlo.

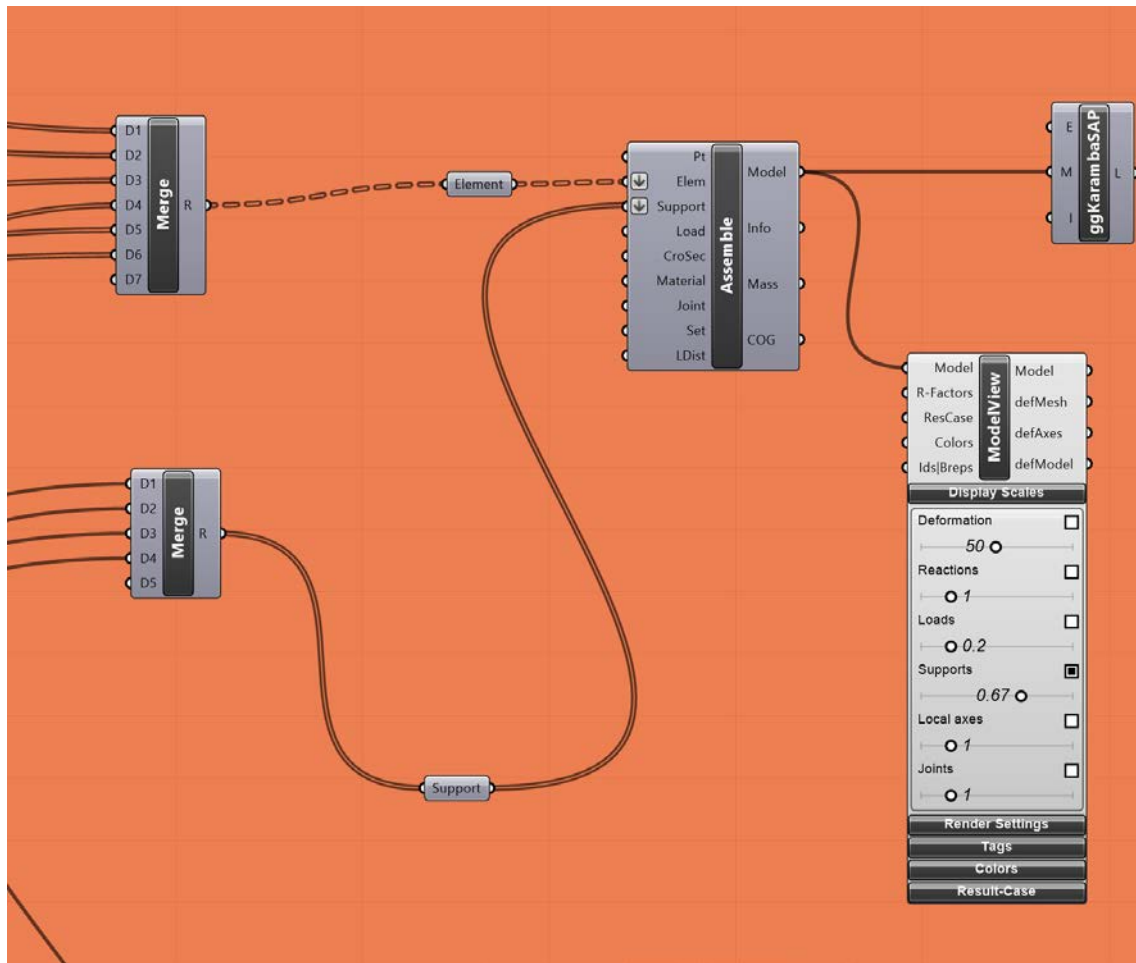


Figura 82. Intercambio y transferencia del modelo generado mediante Karamba 3D a SAP2000.

CAPÍTULO 5. CÁLCULO ESTRUCTURAL DEL CASO DE ESTUDIO

En este Capítulo se recogerán los resultados obtenidos a partir del cálculo estructural llevado a cabo para el análisis de la configuración inicial de la situación de estudio. Tras la definición, en el Capítulo 4, del modelo de cálculo, dicho modelo es importado en formato “.IFC” en SAP2000; el modelo de cálculo, recoge los elementos que componen la estructura, así como las condiciones de apoyo impuestas; no obstante, es necesario definir los materiales con los que dichos elementos están constituidos, así como las secciones transversales de los mismos, y el estado de cargas a las que el conjunto estructura estará sometido.

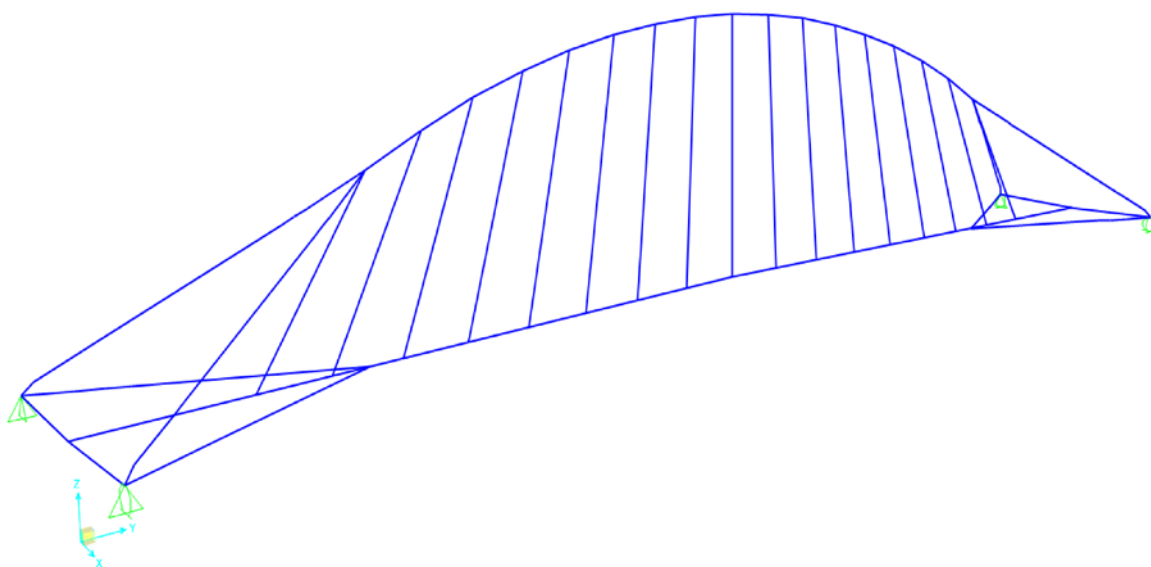


Figura 83. Modelo de cálculo de la situación de estudio realizado mediante Karamba 3D e importado en SAP2000.

En primer lugar, se definirán los materiales que constituyen los distintos elementos estructurales. A continuación, se definirán las distintas secciones transversales que componen el conjunto estructura. Finalmente, se detallará la identificación del conjunto de elementos que configuran cada componente estructural, así como la sección transversal y los materiales asociados a los mismos.

- Materiales

- Por un lado, en las chapas que sirven para configurar los elementos estructurales se empleará acero S355.
- A su vez, en los perfiles metálicos, se empleará acero S275.

- Secciones transversales modelizadas de los elementos estructurales
 - Secciones en arco

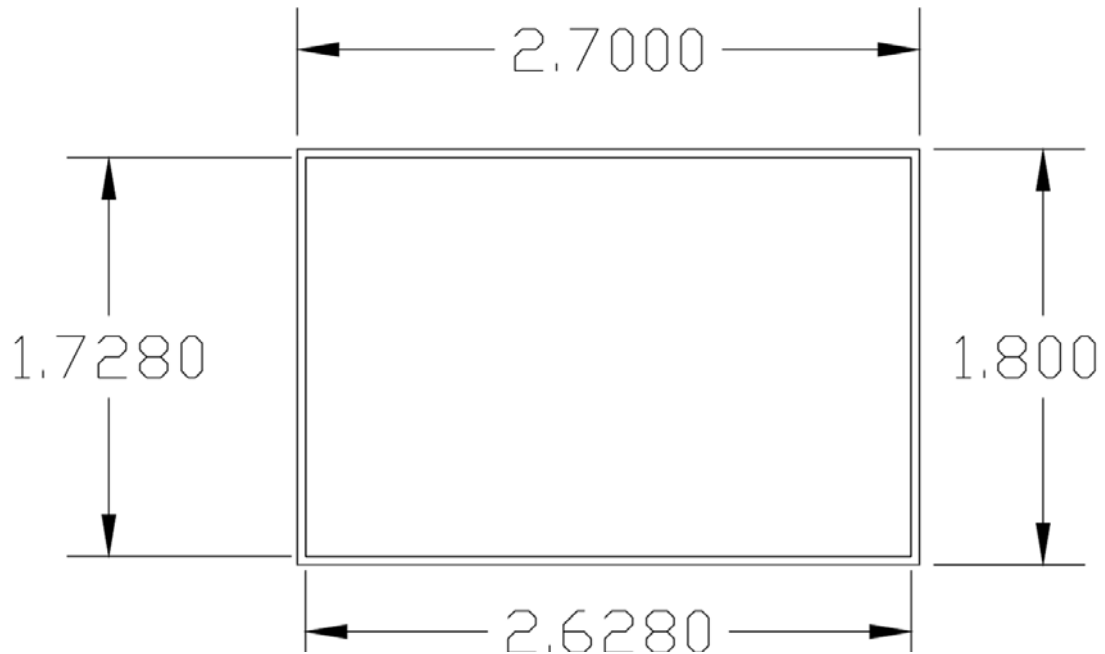


Figura 84. Sección tipo arco 1. Cotas en metros.

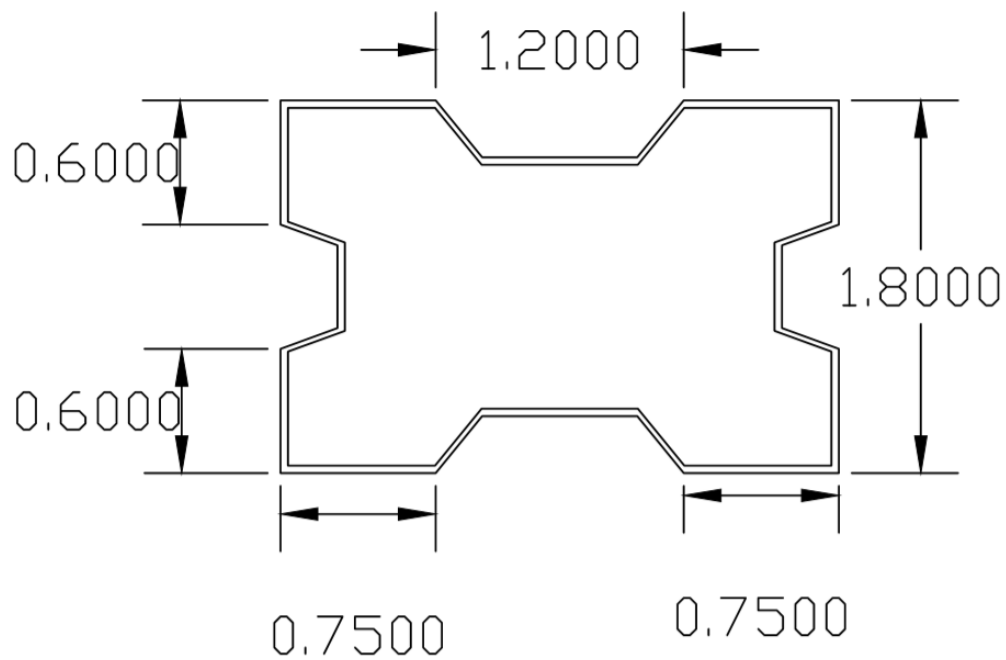


Figura 85. Sección tipo arco 3. Cotas en metros.

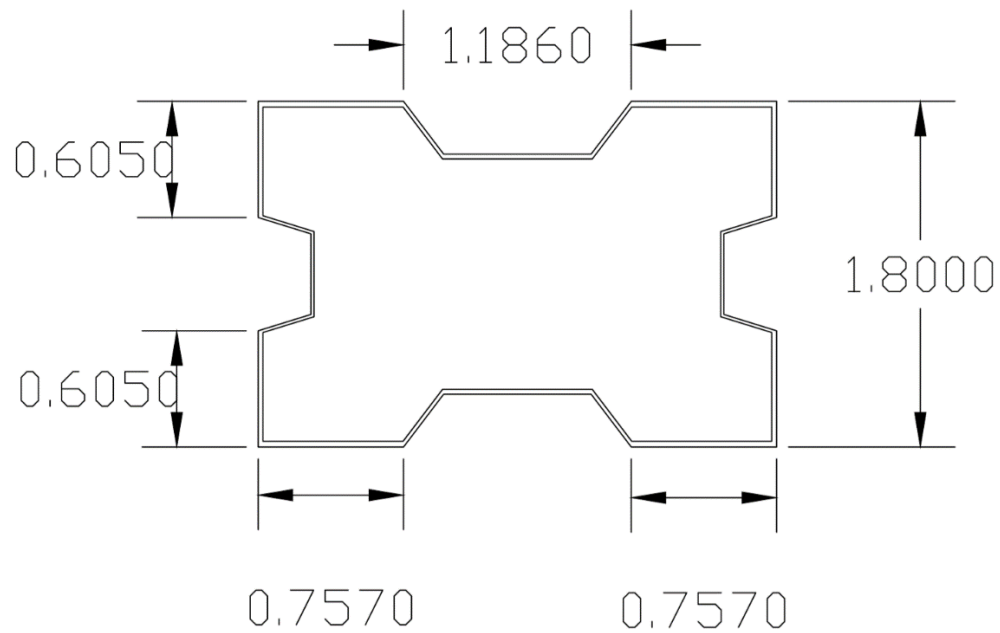


Figura 86. Sección tipo arco 5. Cotas en metros.

- Secciones en tablero

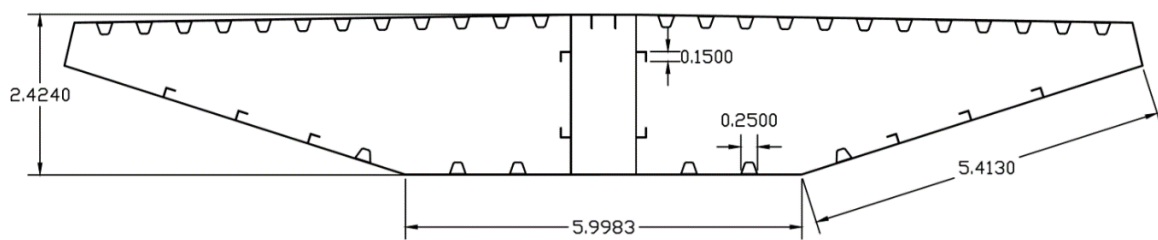


Figura 87. Sección tipo tablero. Cotas en metros.

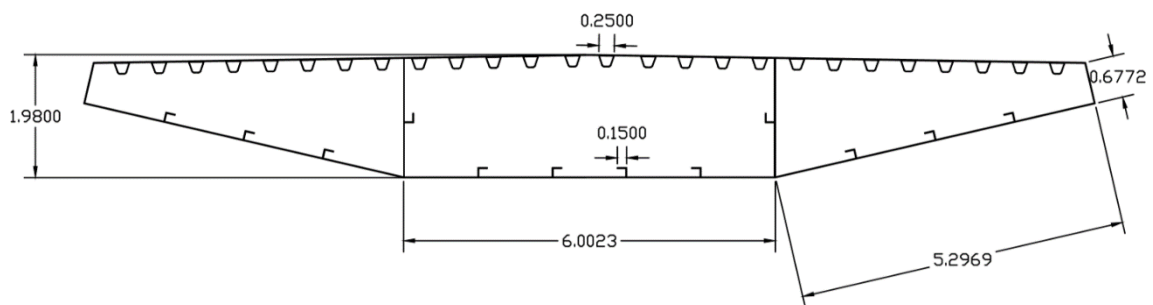


Figura 88. Sección tipo pasarelas laterales. Cotas en metros.

- Secciones en tornapuntas

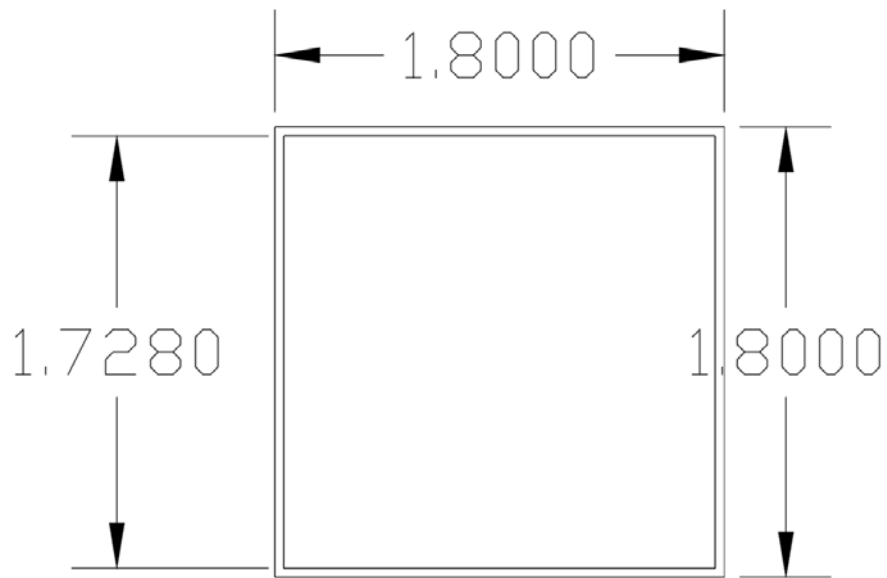


Figura 89. Sección inicial de las tornapuntas. Cotas en metros.

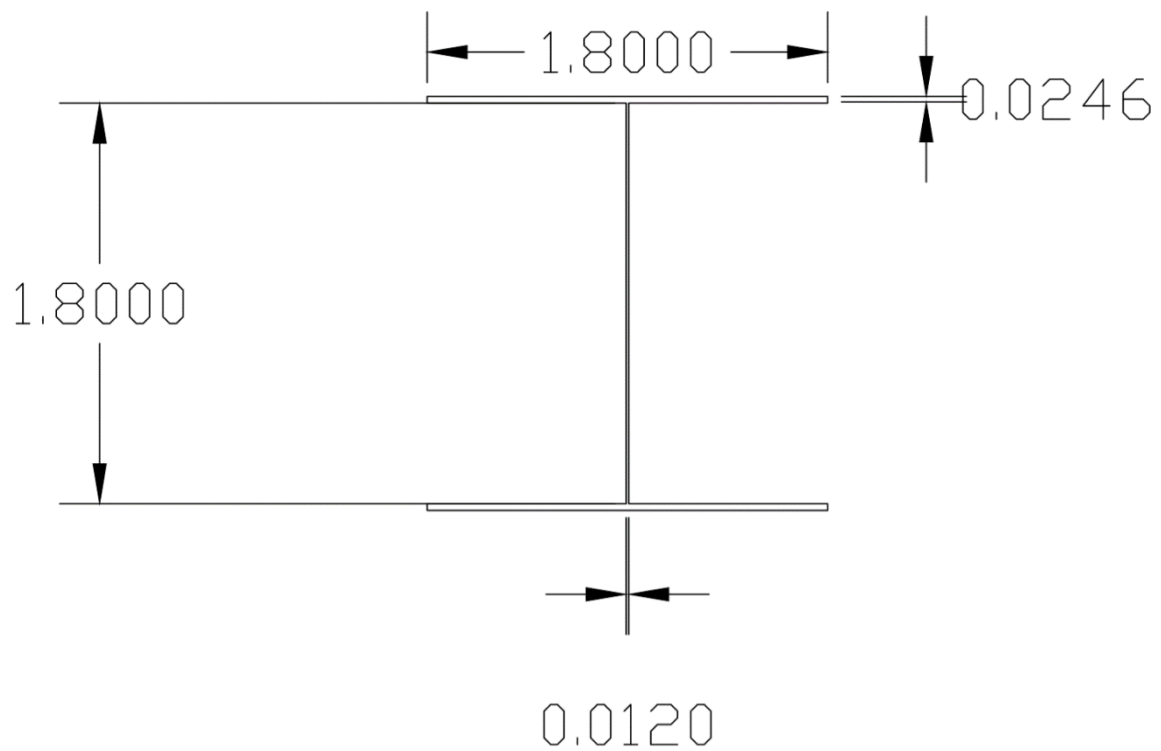


Figura 90. Sección tipo 1 en tornapuntas. Cotas en metros.

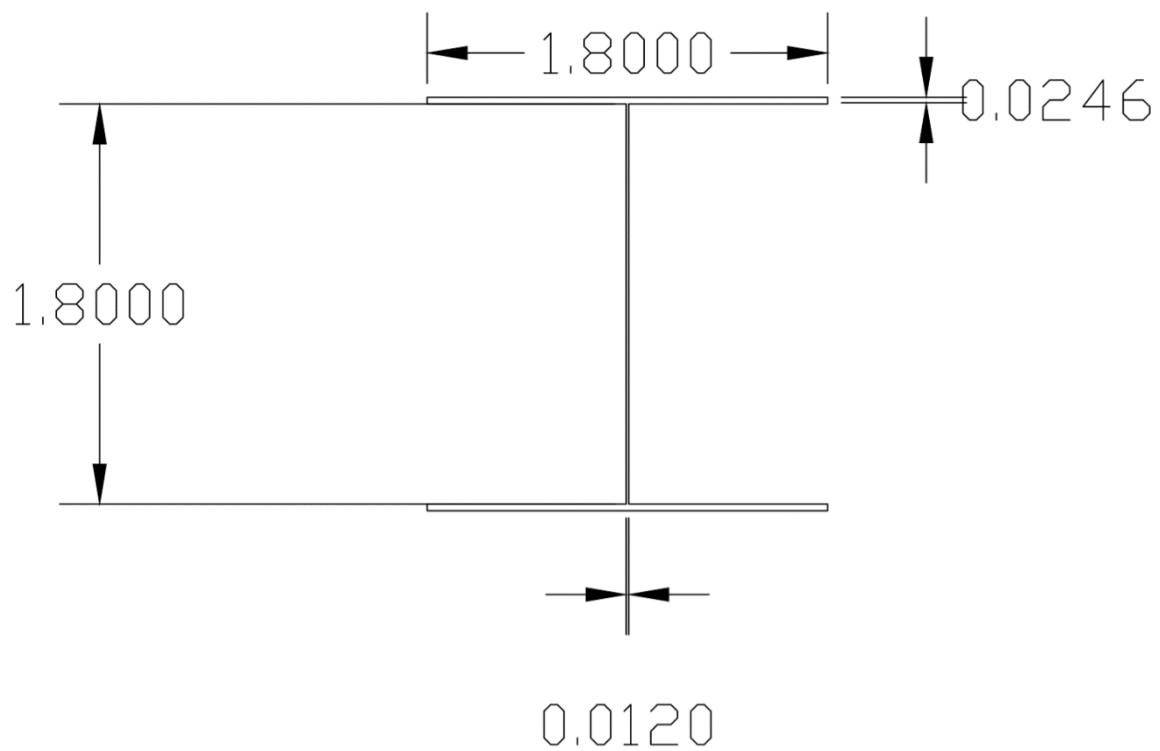


Figura 91. Sección tipo 2 en tornapuntas. Cotas en metros.

- Secciones en pies inclinados

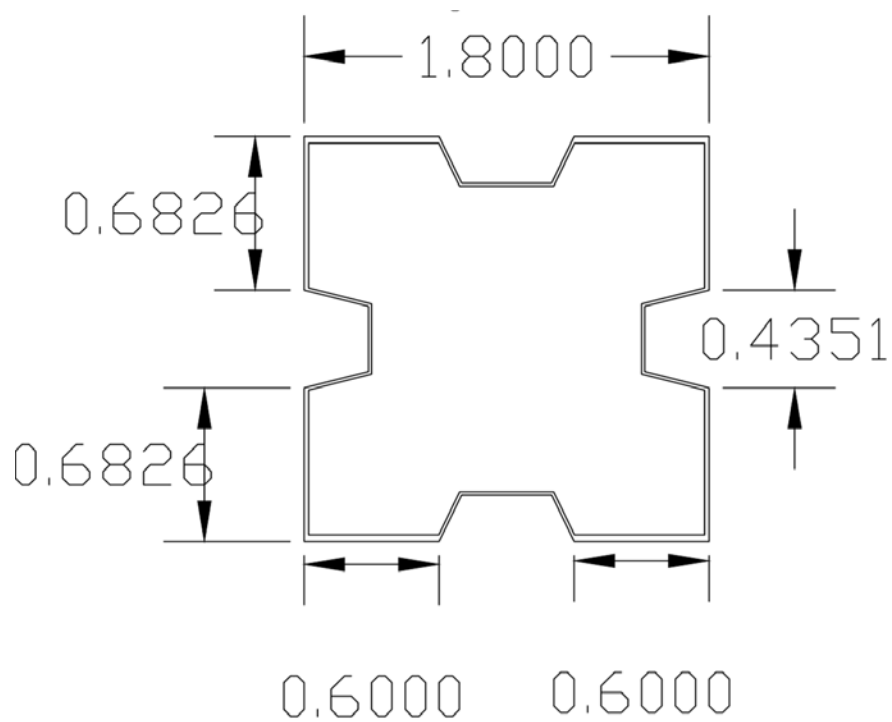


Figura 92. Sección tipo pies inclinados. Cotas en metros.

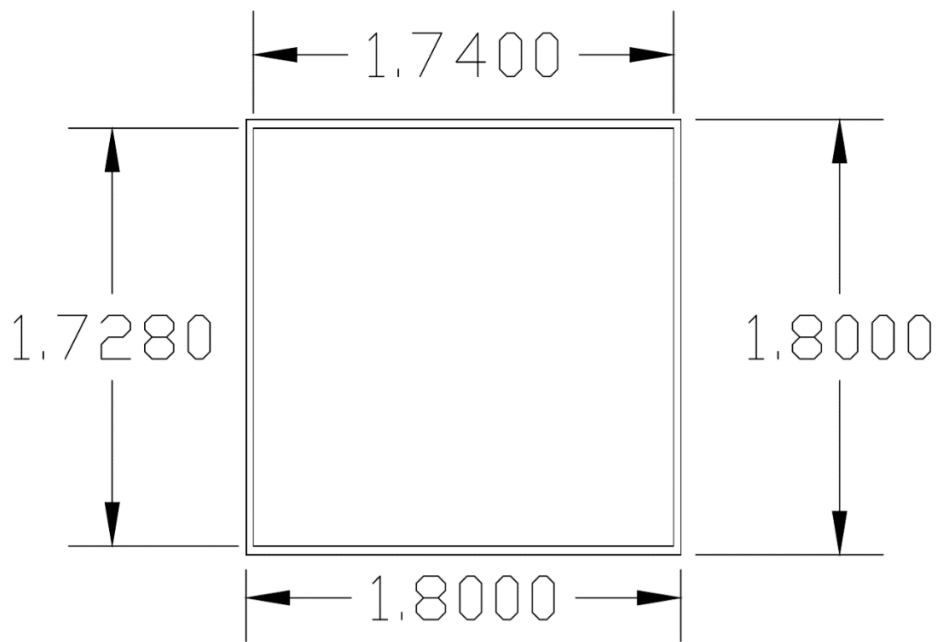


Figura 93. Sección final pies inclinados. Cotas en metros.

- Sección en traviesa de apoyo

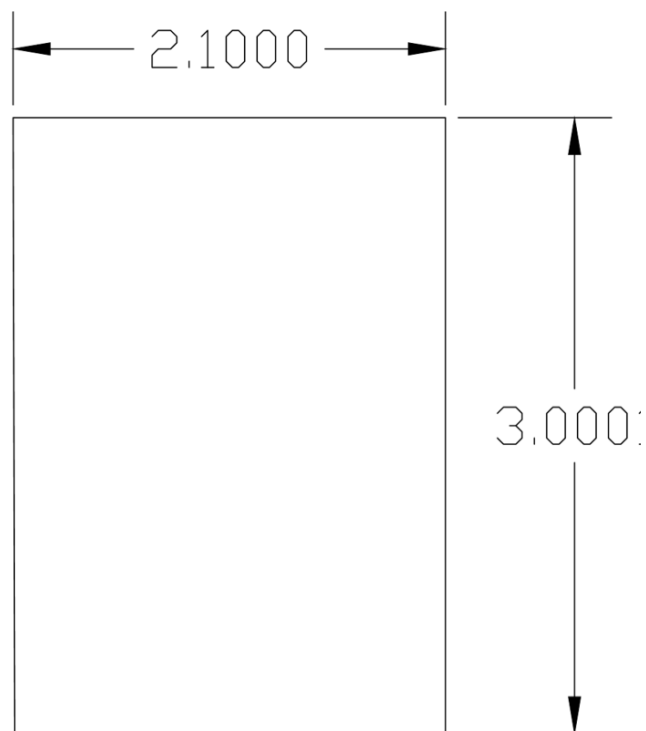


Figura 94. Sección traviesa de apoyo simplificada. Cotas en metros.

- Sección nudo de arranque de los pies inclinados

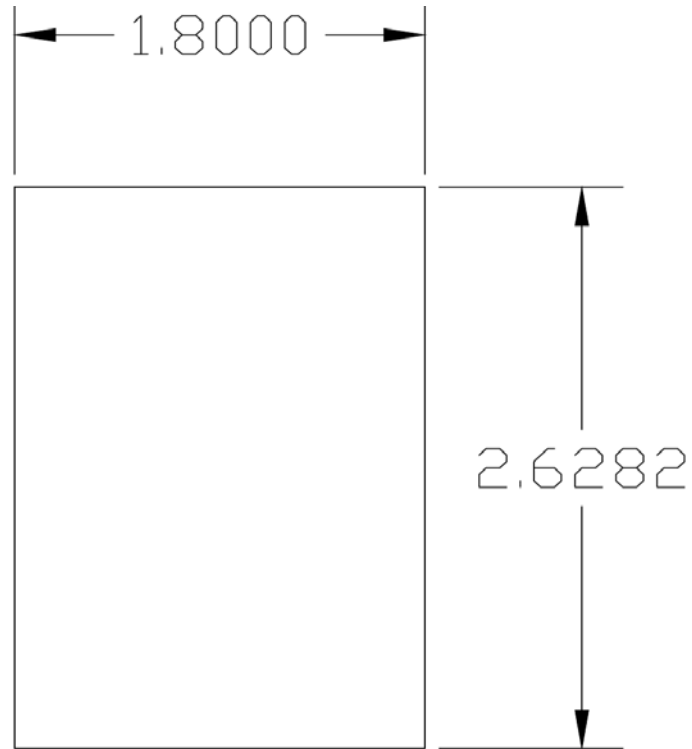


Figura 95. Sección en nudo de arranque simplificada. Cotas en metros.

- Sección en péndolas

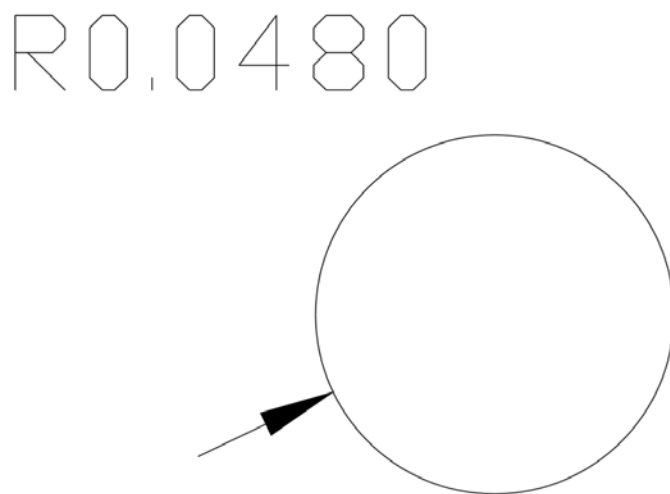


Figura 96. Sección en péndolas. Cotas en metros.

- Identificación de los elementos que componen el conjunto estructural. Secciones transversales y materiales asociados a los mismos.

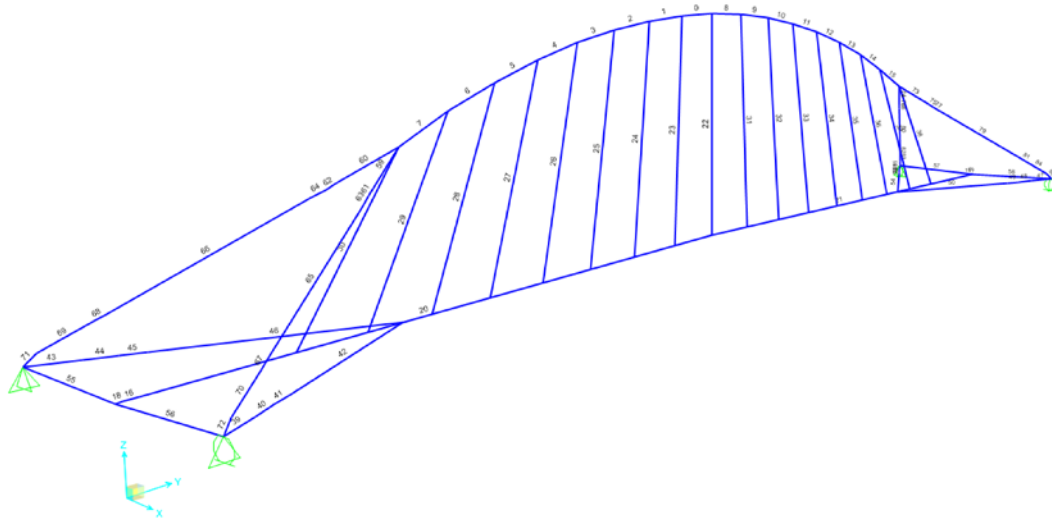


Figura 97. Identificación de los elementos del modelo de cálculo Karamba 3D en SAP 2000.

Tabla 2. Definición de cada elemento en el modelo estructural. Secciones transversales y materiales que los constituyen.

| Componente estructural | ID. Elemento en Modelo | Sección Transversal | Material |
|------------------------|-------------------------|-------------------------------|----------|
| Péndolas | [22,36] | Sección en péndolas | S355 |
| Arco | 7-15 | Sección tipo arco 1 | S355 |
| Arco | 6-14 | Sección tipo arco 3 | S355 |
| Arco | [5,13] | Sección tipo arco 5 | S355 |
| Tablero | 16-17-20-21 | Sección tipo tablero | S355 |
| Tablero | 18-19 | Sección tipo pasarela lateral | S355 |
| Tornapuntas | 39-43-47-51 | Sección inicial tornapuntas | S275 |
| Tornapuntas | 40-44-48-52 | Sección tipo 1 tornapuntas | S275 |
| Tornapuntas | 41-42-45-46-49-50-53-54 | Sección tipo 2 tornapuntas | S275 |
| Pies inclinados | [69,72], [83,86] | Sección nudo de arranque | S355 |
| Pies inclinados | [63,68], [77,82] | Sección tipo pies inclinados | S355 |
| Pies inclinados | [59,62], [73,76] | Sección final pies inclinados | S355 |
| Traviesa Apoyo | [55,58] | Sección traviesa de apoyo | S355 |

Tras haber identificado en el modelo de cálculo los elementos estructurales que lo componen y, tras haber determinado las secciones transversales y materiales que tienen asociados, es necesario referenciar dichas características a los elementos en cuestión a partir de SAP2000. Una vez realizada dicha asignación, resulta preciso definir los estados de carga actuantes, con el fin de realizar el análisis estructural. Para ello, previamente, se determinarán las cargas consideradas que actuarán sobre la estructura.

- **Definición de las cargas actuantes en el caso de estudio.**

En este punto se definirán las diversas cargas que actúan sobre la estructura. Una vez hayan sido determinadas, se combinarán los esfuerzos producidos, tal y como se recoge en la normativa IAP-11. “Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera”, para el grupo de cargas 1, el cual está asociado a cargas verticales. Para esta situación de estudio, únicamente se considerarán las cargas que actúan sobre el tablero, así como el peso propio de los distintos elementos, con la finalidad de comprender el funcionamiento y el trabajo del puente arco.

- **Peso propio**

A partir de la elaboración de los modelos previamente definidos, así como, a través de la asignación de las diversas secciones transversales y materiales de los elementos que conforman la estructura, el efecto del peso propio se calcula de forma directa a través de SAP2000. Por lo que, su implementación es automática en el cálculo, una ha sido definido el modelo.

- **Carga permanente**

Empleando la normativa IAP-11, se determinará la acción que genera el pavimento que gravita sobre la estructura. Para ello, se asumirá que el pavimento está compuesto por una capa de 8 cm de mezcla bituminosa, el cual tiene asociado un peso específico de $\gamma=23 \text{ kN/m}^3$.

Sabiendo que la anchura de la plataforma es de 16 metros, se tiene:

$$CP \left(\frac{kN}{m} \right) = \left(0,08 \text{ m} \times 16 \text{ m} \times 23 \frac{kN}{m^3} \right) \times 1,5 = 44,16 \frac{kN}{m}$$

Por lo tanto, la carga permanente supondrá una carga uniformemente repartida de valor igual al obtenido.

- Sobrecarga de uso

Tal y como se recoge en la normativa IAP-11, es necesario considerar una sobrecarga, de tipo puntual asociada a los vehículos pesados, así como una sobrecarga uniformemente repartida. Para ello, es necesario determinar el número de carriles virtuales para la definición de las mismas. Aprovechando la simetría de la situación a analizar, se realizarán los cálculos de las sobrecargas producidas, tanto uniformemente repartidas, como puntuales para media plataforma, realizando, posteriormente el proceso de carga en el modelo de cálculo, para la totalidad de la misma.

w : Ancho de la plataforma $\geq 6 \text{ m}$

$$n_L: \text{Número de carriles virtuales} = \text{ent} \left(\frac{w}{3} \right) \\ = 3 \text{ carriles virtuales}$$

w_L : Anchura carril virtual $= 3 \text{ m}$

A partir de la división de la plataforma en carriles virtuales, se determinará el valor característico de la sobrecarga de uso:

$2Q_{ik}$: Sobrecarga de uso de los vehículos pesados

q_{ik} : Sobrecarga de uso de la carga uniformemente

$$2Q_{ik} = 1200 \text{ kN}$$

$$q_{ik} = 3 \text{ m} \times 9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + \left(2 \text{ carriles} \times 3 \frac{\text{m}}{\text{carril}} \right) \times 2,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 42 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Una vez han sido definidas las cargas actuantes, se cargará el modelo de cálculo definido con anterioridad con las mismas. A su vez, se determinará la combinación que recoge la normativa IAP-11, para la sobrecarga persistente, según la concomitancia de las diferentes componentes de la sobrecarga de uso.

De tal forma que:

$$1,35 \times PP + 1,35 \times CP + 1,5 \times SCP + 1,5 \times 0,4 \times SCU$$

- Resultados de cálculo de la situación inicial a partir de la combinación de esfuerzos recogida en la IAP-11.

Tabla 3. Resultados del cálculo estructural de la situación de estudio para la combinación frecuente la normativa IAP-11.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) |
|----------|----------|----------|
| 17 | -15435,5 | -29639,7 |
| 16 | -11556,6 | -27950,2 |
| 15 | -6433,18 | -26453,7 |
| 14 | -2191,27 | -25389,1 |
| 13 | 1038,469 | -24665,9 |
| 12 | 3749,224 | -24177 |
| 11 | 6265,189 | -23854,7 |
| 10 | 8323,99 | -23681,4 |
| 1 | 9254,766 | -23676,5 |
| 2 | 8323,99 | -23681,4 |
| 3 | 6265,189 | -23854,7 |
| 4 | 3749,224 | -24177 |
| 5 | 1038,469 | -24665,9 |
| 6 | -2191,27 | -25389,1 |
| 7 | -6433,18 | -26453,7 |
| 8 | -11556,6 | -27950,2 |
| 9 | -15435,5 | -29639,7 |

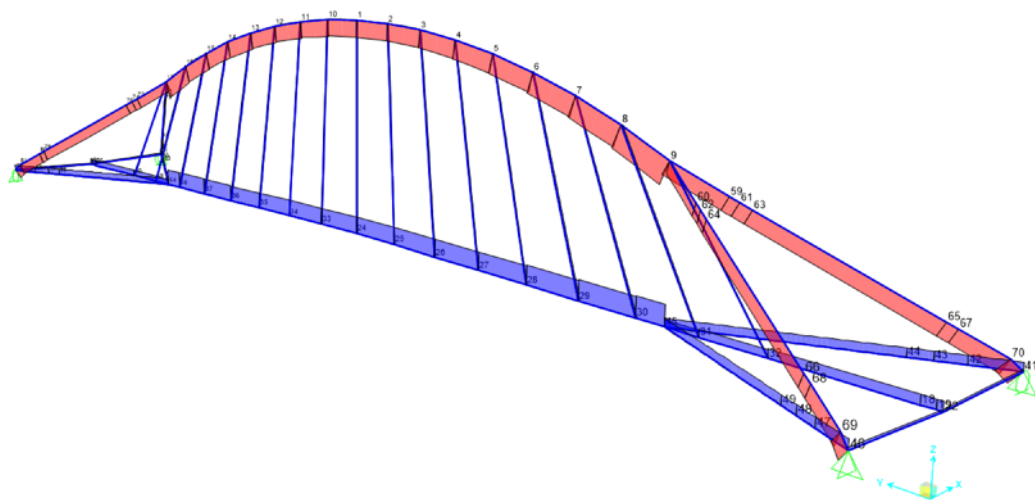


Figura 98. Ley de axiles, asociada a la combinación frecuente recogida en la IAP-11.

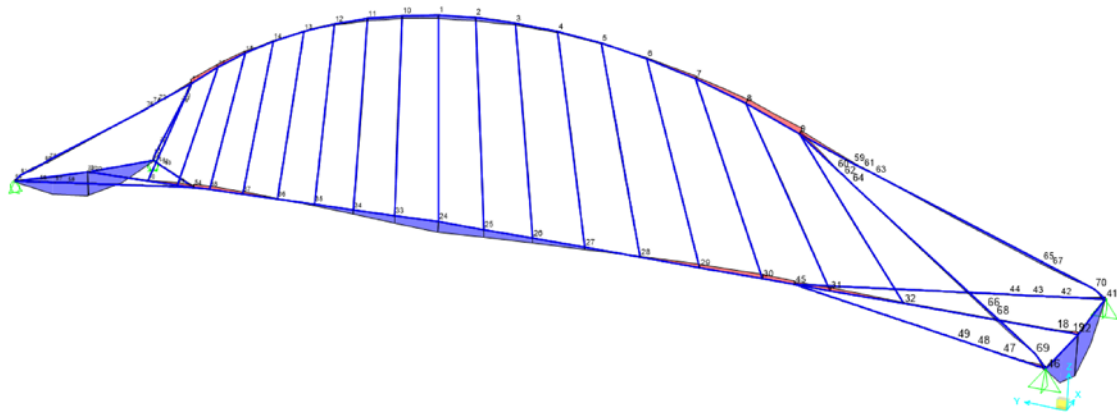


Figura 99. Ley de momentos flectores, asociada a la combinación frecuente recogida en la IAP-11.

Una vez obtenidos los resultados del modelo de cálculo, cabe destacar que, el mismo proporciona soluciones coherentes; ya que tal y como se recoge en el Capítulo 2 de este trabajo de fin de máster, el fundamento de un puente arco inferior es que, el tablero trabaje a modo de tirante, estando completamente traccionado, tal y como muestran los resultados obtenidos. A su vez, tanto la traviesa de apoyo, como las tornapuntas y las péndolas, son elementos que recogen la tracción, tal y como cabía esperar.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL CASO DE ESTUDIO

A lo largo de este Capítulo, se tomarán como punto de partida los resultados obtenidos a partir del cálculo estructural realizado con anterioridad; a su vez, el empleo del modelo paramétrico desarrollado en el Capítulo 3, tendrá la función de configurar los distintos modelos de cálculo que serán empleados para realizar un análisis estructural de las distintas situaciones a estudiar.

El objetivo fundamental de este capítulo reside en tratar de analizar diferentes combinaciones de la directriz del arco, así como de las secciones del mismo, con el fin de comprobar si la directriz del arco inicial, supone el mejor ajuste del antifunicular de las cargas, o si, por el contrario, existe alguna otra configuración de la misma, que responda de forma más adecuada frente a este fenómeno. Para poder llevar a cabo dicho análisis, en primer lugar, se determinará, para cada una de las secciones del arco a analizar, el núcleo central de las mismas, con el fin de determinar la envolvente de dichos núcleos centrales. Una vez representada dicha envolvente, se analizará la línea de presiones obtenida, mediante los resultados que proporciona el cálculo estructural; de tal forma que, si la línea de presiones se encuentra en el interior de dicha envolvente, se garantiza la existencia de compresiones, mientras que si, en caso contrario, se encuentra fuera de la misma, aparecerán tracciones en el arco. Para la definición de la línea de presiones, se evaluará la relación entre el momento flector y el esfuerzo axial, ya que:

$$\frac{M \text{ (kN.m)}}{N \text{ (kN)}} = e \text{ (m)}$$

Tras obtener dicha excentricidad, es posible determinar la variación de los puntos de la directriz del arco de cálculo, y determinar de esta manera, la línea de presiones asociada

Como punto de partida para este análisis, se tomará la línea de presiones asociada a la directriz original del puente.

Cabe destacar que este análisis se desarrolla desde un punto de vista teórico, con el fin de analizar la influencia de la directriz y de las secciones del arco en los esfuerzos que se producen en el mismo. Al tratarse de un arco constituido por acero, obtener que el mismo se encuentre siempre comprimido puede no ser una ventaja, a diferencia de un puente arco constituido por hormigón, en el cual las tracciones darían lugar a la fisuración del mismo, ya que las compresiones pueden generar inestabilidades y fenómenos de segundo orden, tales como el pandeo en secciones esbeltas, más perjudiciales en sí, que las propias tracciones.

6.1. DEFINICIÓN DE LA ENVOLVENTE DE LOS NÚCLEOS CENTRALES DE LAS SECCIONES QUE CONFIGURAN EL ARCO

La definición de la envolvente de los núcleos centrales se llevará a cabo, nuevamente mediante programación visual. Este paquete de código programado, recibirá las distintas secciones del arco, calculando de esta manera el núcleo central de las mismas, y por extensión entre secciones, es posible determinar dicha envolvente. Resulta obvio mencionar que, existirá una variación en las secciones de dicha envolvente, siempre y cuando se varíen las secciones del arco; de tal forma que, en los primeros casos a analizar, no existirá variación en su sección, ya que exclusivamente se modificará la directriz, con el fin de analizar la de mejor ajuste, existiendo, en este caso, una variación en su posición. Independientemente de ello, para poder realizar dicho análisis, se requiere la definición inicial de la envolvente de los núcleos centrales. Su representación se lleva a cabo mediante la teoría de resistencia de materiales y tras imponer una serie de condicionantes de tipo geométrico, asociados a la intersección de las fibras neutras de la sección a analizar.

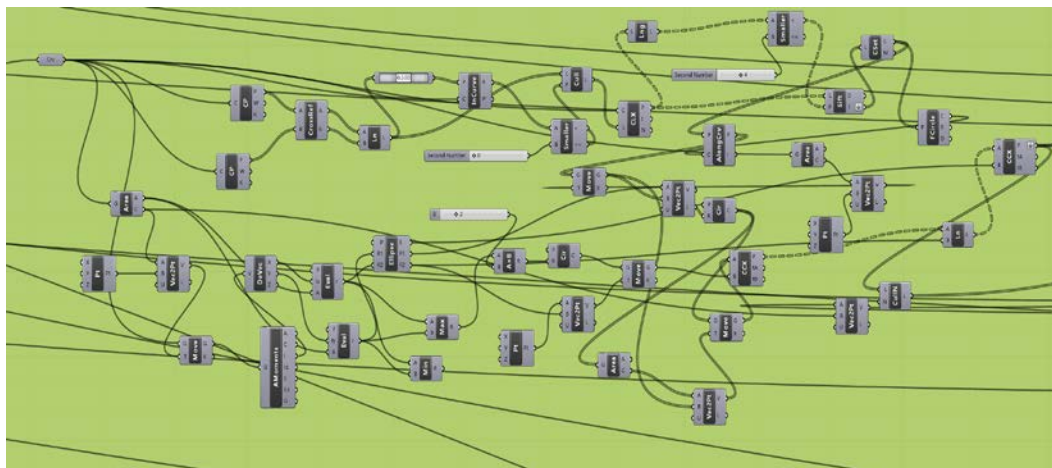


Figura 100. Determinación del núcleo central de la sección inicial del arco.

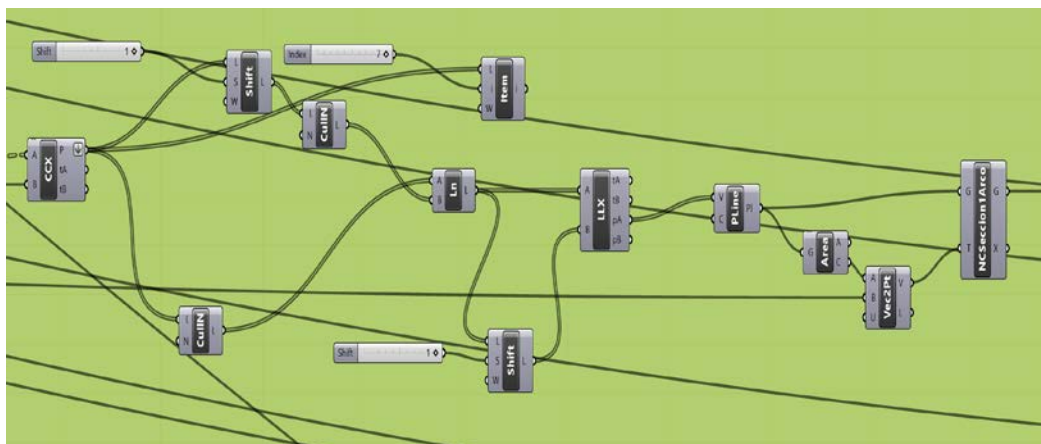


Figura 101. Modelización del núcleo central de la sección inicial del arco.

Una vez, han sido modelizados los núcleos centrales de las distintas secciones de los arcos, se procede a la generación del solido que agrupa a las mismas, constituyendo, de esta forma, su envolvente. Tal y como se ha descrito anteriormente, dicha envolvente conformará los límites dentro de los cuales pueda encontrarse la directriz del arco a analizar, de tal forma que siempre pueda garantizarse que se encuentre comprimida.

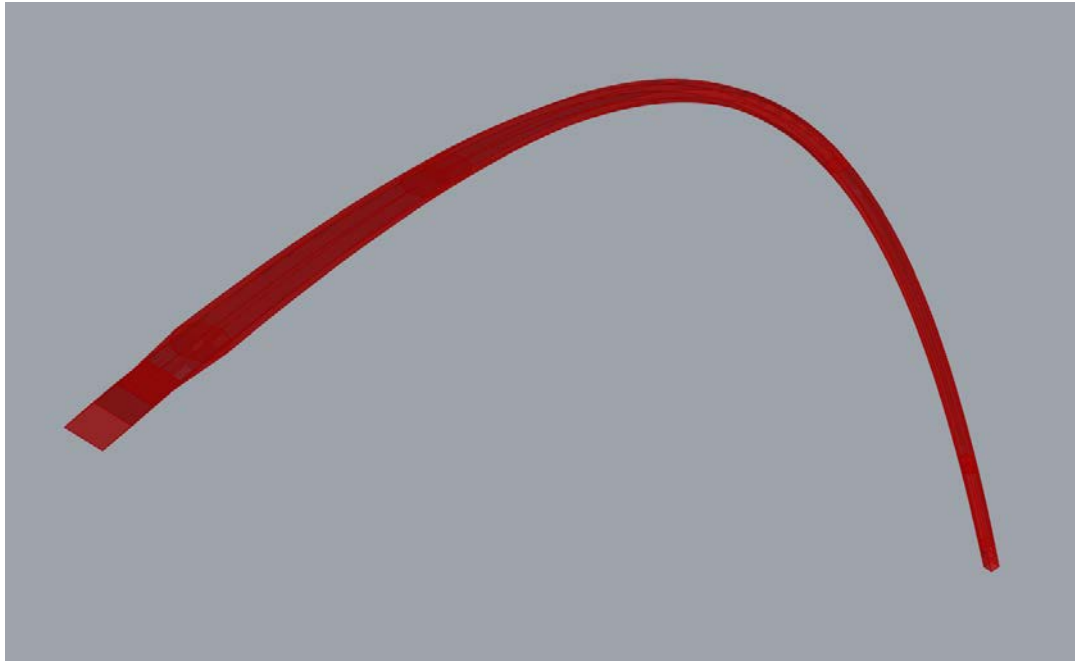


Figura 102. Envolvente de los Núcleos centrales de las secciones del arco.

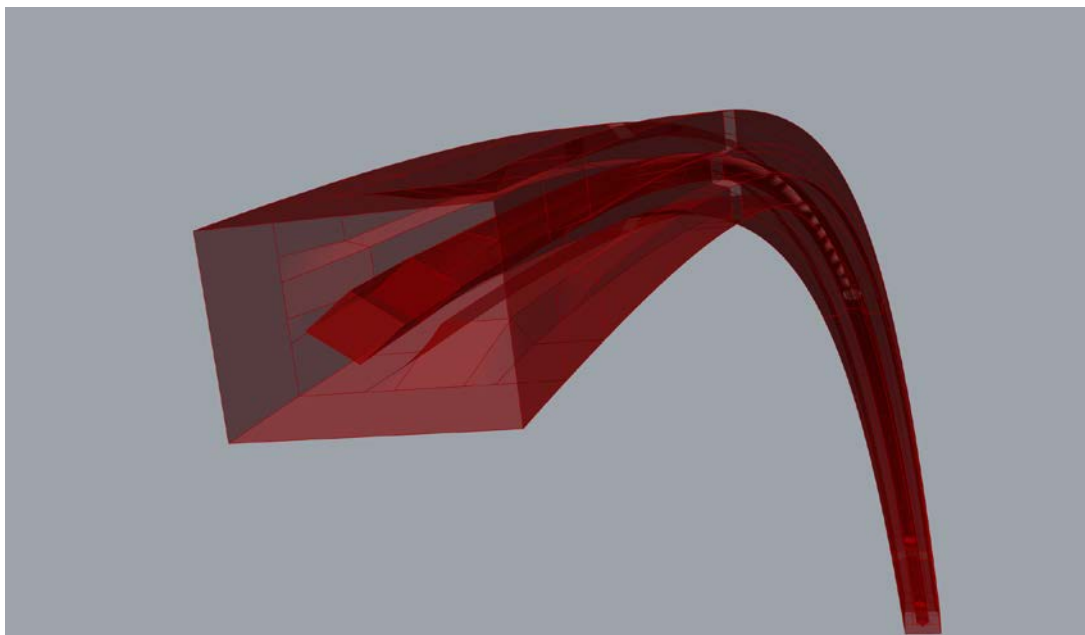


Figura 103. Detalle de la envolvente de los Núcleos centrales de las secciones del arco.

De esta forma, se obtiene una envolvente de los núcleos centrales completamente paramétrica, la cual irá variando su geometría de forma automática siempre que se varíen las secciones del arco, y la cual variará su posición, siempre que varíe la posición de la directriz en torno a la cual se extiende.

6.2. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA DIRECTRÍZ DEL ARCO. SECCIÓN DE TABLERO Y SECCIONES DEL ARCO DETERMINADAS

Para abordar este análisis, inicialmente se valorará la situación de estudio. Esto tiene como objetivo determinar la línea de presiones correspondiente a dicha situación; una vez determinada la línea de presiones inicial, se iniciará un proceso iterativo, en el cual esa línea de presiones, pasará a configurar la nueva directriz a analizar, para obtener así una nueva línea de presiones, que posteriormente y de la misma forma, pasará a ser esa nueva directriz. La finalidad radica en tratar de obtener, con el menor número de simulaciones posibles, una curva que se ajuste dentro de la envolvente de los núcleos centrales.

6.2.1. ANÁLISIS CONSIDERANDO EXTREMOS DEL ARCO FIJOS

Bajo este enfoque, en primer lugar, se realizará un primer estudio, en el cual los extremos del arco no varían, y, por consiguiente, tampoco la posición de los pies inclinados ni de los nudos de enlace entre ambos elementos. De esta forma, las nuevas directrices tendrán los puntos variables de las líneas de presiones obtenidas, pero manteniendo la posición de los extremos del arco.

6.2.1.1. DIRECTRÍZ 1. DIRECTRÍZ DE LA CONFIGURACIÓN INICIAL

A partir de los resultados obtenidos mediante el cálculo estructural realizado en el Capítulo 5, se comienza a analizar la variación de los esfuerzos que se producen en el arco en función de la directriz del mismo.

Tal y como puede verse, la línea de presiones obtenida para la configuración inicial, se ajusta en su mayor parte a la envolvente de los núcleos centrales generados. No obstante, en los extremos del arco y en su parte central, se encuentra susceptible fuera de los límites de dicha envolvente. Es por ello que, en teoría, se justifica el empleo de dicha línea de presiones, como nueva directriz a analizar, para iniciar el proceso iterativo definido con anterioridad.

Tabla 4. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz inicial obtenida para la situación de estudio.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -15435,5 | -29639,7 | 0,52077 |
| 16 | -11556,6 | -27950,2 | 0,413472 |
| 15 | -6433,18 | -26453,7 | 0,243186 |
| 14 | -2191,27 | -25389,1 | 0,086307 |
| 13 | 1038,469 | -24665,9 | -0,0421 |
| 12 | 3749,224 | -24177 | -0,15507 |
| 11 | 6265,189 | -23854,7 | -0,26264 |
| 10 | 8323,99 | -23681,4 | -0,3515 |
| 1 | 9254,766 | -23676,5 | -0,39088 |
| 2 | 8323,99 | -23681,4 | -0,3515 |
| 3 | 6265,189 | -23854,7 | -0,26264 |
| 4 | 3749,224 | -24177 | -0,15507 |
| 5 | 1038,469 | -24665,9 | -0,0421 |
| 6 | -2191,27 | -25389,1 | 0,086307 |
| 7 | -6433,18 | -26453,7 | 0,243186 |
| 8 | -11556,6 | -27950,2 | 0,413472 |
| 9 | -15435,5 | -29639,7 | 0,52077 |

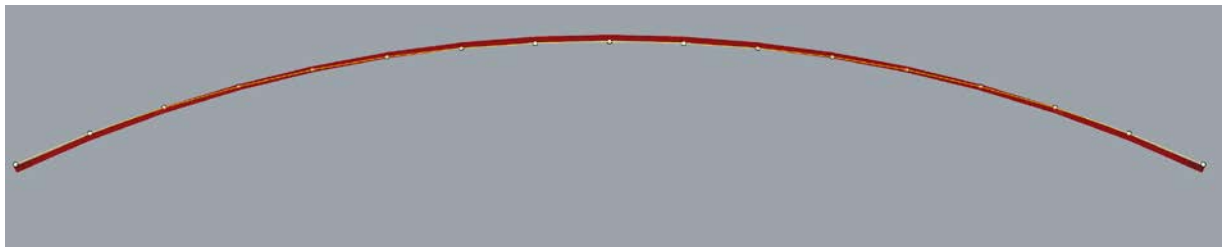


Figura 104. Representación de la línea de presiones asociada a la situación de cálculo inicial.

6.2.1.2. DIRECTRÍZ 2. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA DE LA DIRECTRÍZ 1 DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO

Para este nuevo cálculo, se determinará, como directriz del arco a analizar, la línea de presiones obtenida en el caso anterior. Nótese que, para cada nuevo caso de estudio en el cual se varíe la directriz, es necesario definir un nuevo modelo de cálculo mediante Karamba 3D, de tal forma que recoja esa nueva directriz en su modelo para, posteriormente comunicarlo con la herramienta computacional SAP2000 y volver a realizar el cálculo estructural asociado a esa nueva configuración. No obstante, esto no resulta necesario en los casos en los cuales se varía únicamente la sección del arco, ya que al mantener fija la directriz, no se genera un nuevo modelo de cálculo, sino que se trata del mismo

con unas características geométricas diferentes, las cuales deberán ser asignadas para realizar el cálculo estructural.

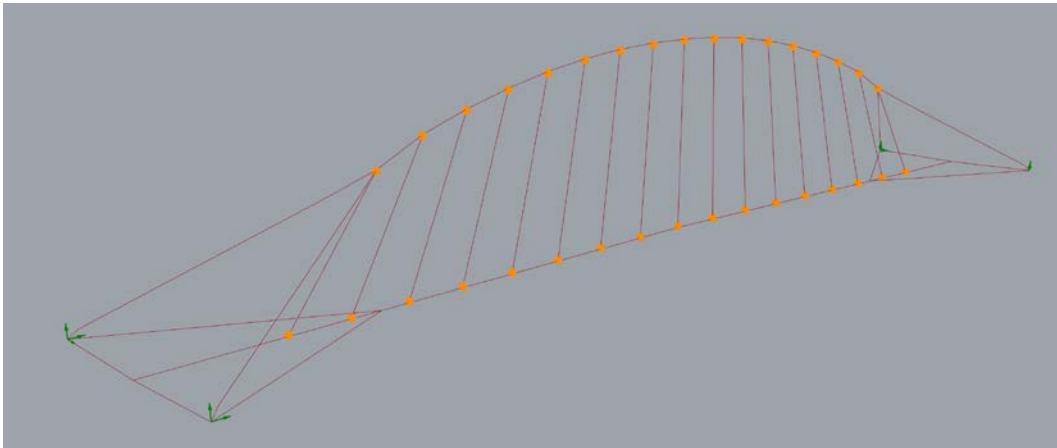


Figura 105. Nuevo modelo de cálculo que emplea como directriz 2 la línea de presiones obtenida para la directriz 1.

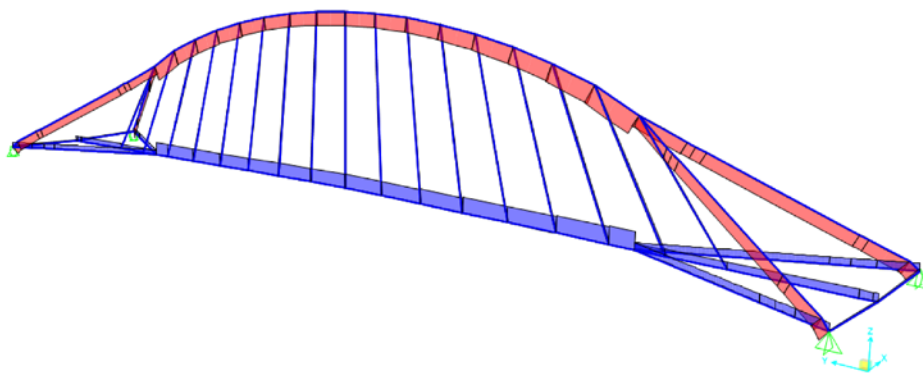


Figura 106. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 2 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

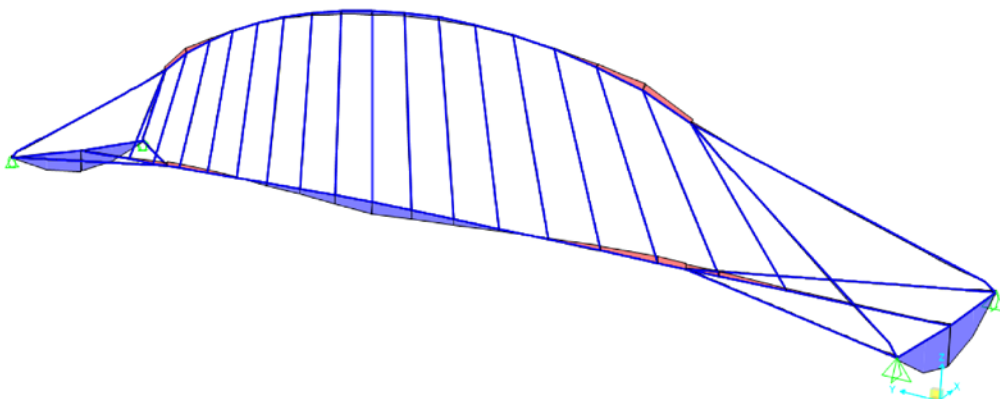


Figura 107. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 2 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Tabla 5. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 2 obtenida para la situación de análisis.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -13002,9 | -29933,8 | 0,434389 |
| 16 | -19156,7 | -28036,1 | 0,683285 |
| 15 | -9724,89 | -26401,1 | 0,368352 |
| 14 | -2935,79 | -25293,9 | 0,116067 |
| 13 | 1355,201 | -24582,9 | -0,05513 |
| 12 | 4601,2 | -24124,2 | -0,19073 |
| 11 | 7772,604 | -23834,5 | -0,32611 |
| 10 | 10610,07 | -23685,1 | -0,44796 |
| 1 | 11988,84 | -23681,2 | -0,50626 |
| 2 | 10610,07 | -23685,1 | -0,44796 |
| 3 | 7772,604 | -23834,5 | -0,32611 |
| 4 | 4601,2 | -24124,2 | -0,19073 |
| 5 | 1355,201 | -24582,9 | -0,05513 |
| 6 | -2935,79 | -25293,9 | 0,116067 |
| 7 | -9724,89 | -26401,1 | 0,368352 |
| 8 | -19156,7 | -28036,1 | 0,683285 |
| 9 | -13002,9 | -29933,8 | 0,434389 |

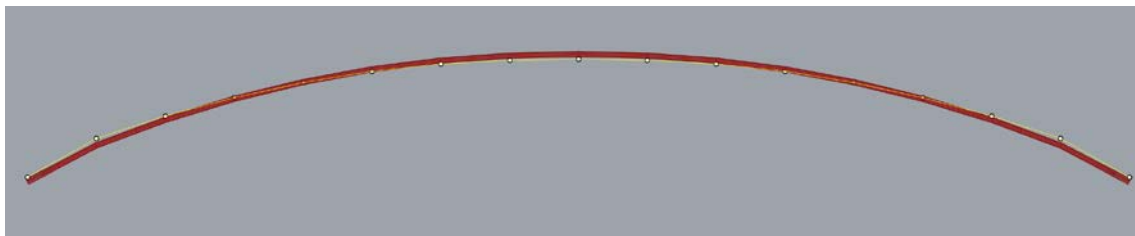


Figura 108. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 2.

Independientemente de que, para este caso de análisis, las excentricidades no aumenten respecto de la situación anterior, e incluso en algunos puntos disminuyan, comienza a apreciarse que, los resultados obtenidos para esta situación de análisis, difieren de los obtenidos para la situación inicial, alejándose los mismos de la envolvente de los núcleos centrales; especialmente en el centro de luz del arco, y en los extremos del mismo.

6.2.1.3. DIRECTRIZ 3. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA DE LA DIRECTRIZ 2 DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO

De forma análoga a lo realizado en el punto anterior, se definirá como nueva directriz del arco a analizar, la línea de presiones obtenida para la directriz 2. Resulta necesario añadir que, dado que los extremos del arco se mantienen fijos, a medida que se va realizando el proceso iterativo y los puntos de la directriz van variando, se pierde parte de la continuidad en la directriz que proporcionaba ese arco circular inicial; por lo tanto, esto da lugar a la existencia de discontinuidades en la directriz en las cuales se generan momentos flectores mayores que en el resto del arco, dando lugar a un aumento en las excentricidades, con una tendencia a alejar la línea de presiones que se obtendrá, de la envolvente de núcleos centrales asociada a la directriz analizada.

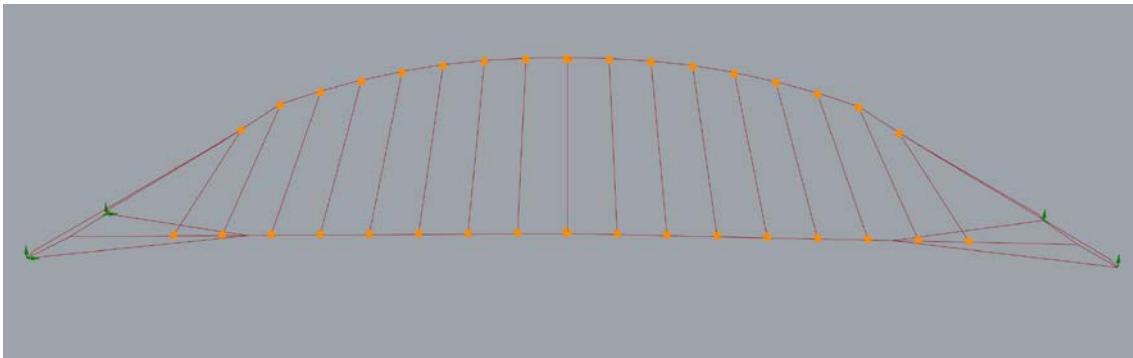


Figura 109. Nuevo modelo de cálculo que emplea como directriz 3 la línea de presiones obtenida para la directriz 2.

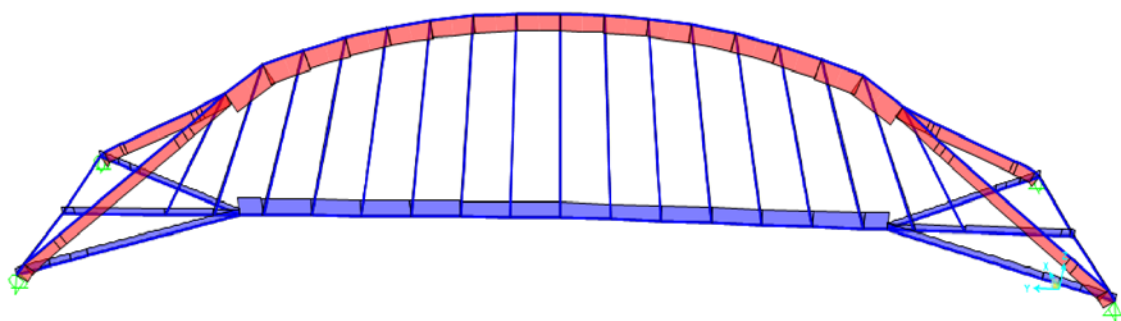


Figura 110. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 3 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

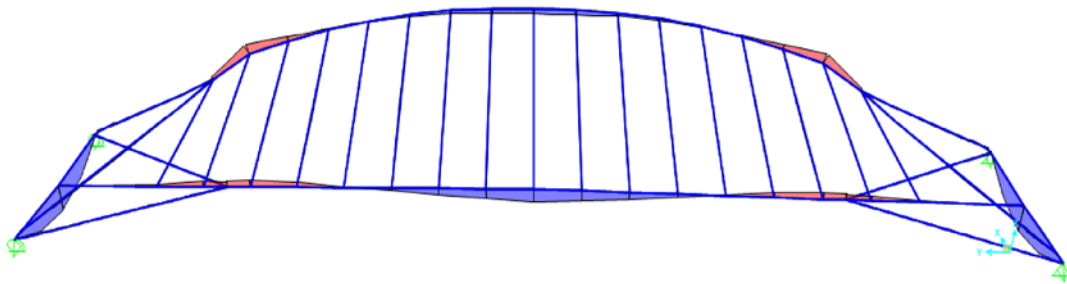


Figura 111. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 3 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Tabla 6. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 3 obtenida para la situación de análisis.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -8811,15 | -30272 | 0,291066 |
| 16 | -31943,8 | -28119,9 | 1,135984 |
| 15 | -14494,7 | -26320,5 | 0,550701 |
| 14 | -3463,34 | -25187,5 | 0,137502 |
| 13 | 2115,824 | -24506,8 | -0,08634 |
| 12 | 5750,545 | -24088 | -0,23873 |
| 11 | 9703,882 | -23836,4 | -0,4071 |
| 10 | 13725,35 | -23716,8 | -0,57872 |
| 1 | 15876,47 | -23714,4 | -0,66949 |
| 2 | 13725,35 | -23716,8 | 0,371516 |
| 3 | 9703,882 | -23836,4 | -0,4071 |
| 4 | 5750,545 | -24088 | -0,23873 |
| 5 | 2115,824 | -24506,8 | -0,08634 |
| 6 | -3463,34 | -25187,5 | 0,137502 |
| 7 | -14494,7 | -26320,5 | 0,550701 |
| 8 | -31943,8 | -28119,9 | 1,135984 |
| 9 | -8811,15 | -30272 | 0,291066 |

Tal y como se detallaba con anterioridad, las discontinuidades que se producen por mantener fijos los extremos del arco en las nuevas directrices empleadas, generan que aumenten notablemente los momentos flectores, alejando de esta forma la línea de presiones obtenida en dichos puntos, respecto de la envolvente de los núcleos centrales.

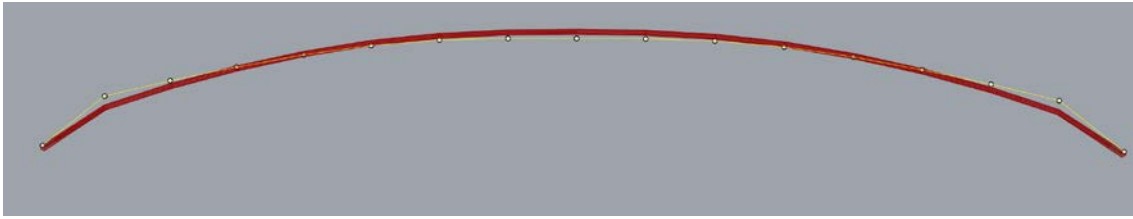


Figura 112. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 3.

Los resultados obtenidos, se corresponden con lo descrito con anterioridad, ya que los momentos producidos en los nudos 8 y 16 del arco, comienzan a incrementar de forma importante su valor. Nuevamente, en la parte central del arco, la línea de presiones comienza a alejarse de la envolvente generada por los núcleos centrales.

6.2.1.4. DIRECTRÍZ 4. AJUSTE ENTRE LA DIRECTRÍZ INICIAL Y LA LÍNEA DE PRESIONES ASOCIADA A LA MISMA DEL CASO DE ESTUDIO

En vista de los resultados obtenidos y, según la tendencia a incrementarse los momentos flectores que se producen en los nudos cercanos a los extremos del arco, lo cual aleja la línea de presiones obtenida, se propone abandonar el enfoque iterativo, tratando de lograr un ajuste de la línea de presiones; para esto se propone emplear como directriz, una directriz ajustada entre la directriz inicial y la propia línea de presiones generada para esa directriz.

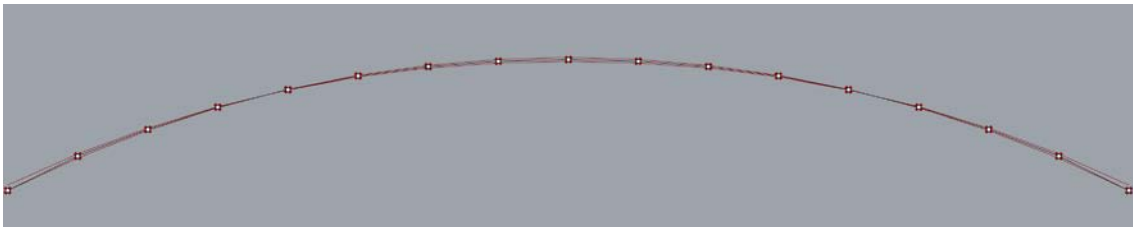


Figura 113. Directriz 4. Directriz de ajuste entre la directriz inicial y su línea de presiones correspondiente.

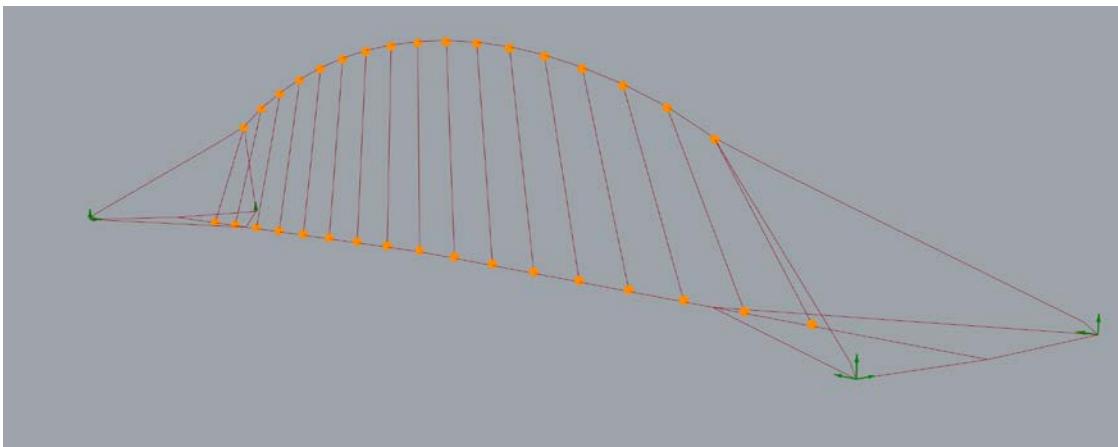


Figura 114. Modelo de cálculo generado asociado a la directriz 4.

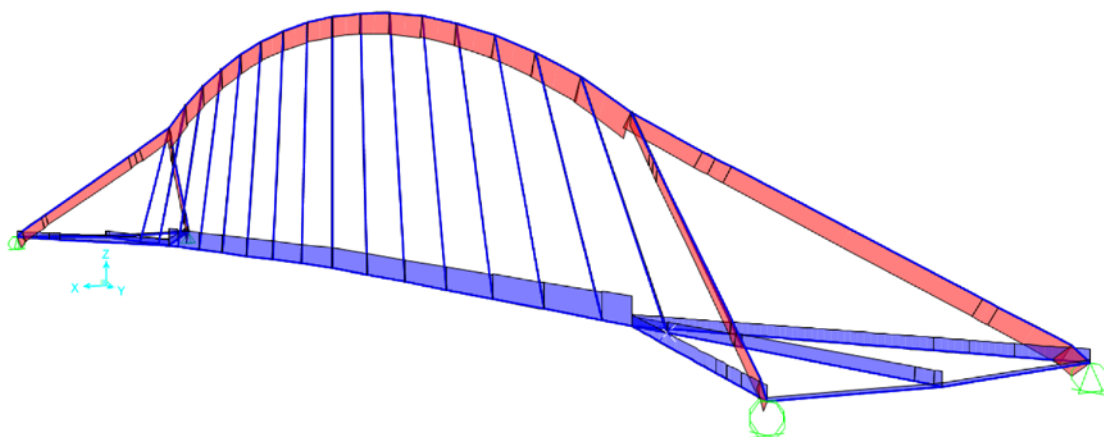


Figura 115. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 4 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

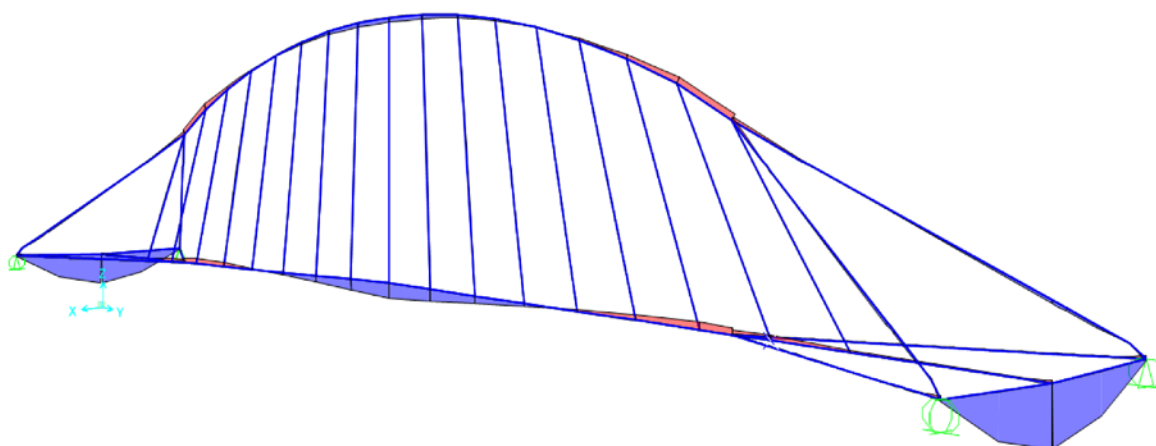


Figura 116. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 4 como directriz del arco. Combinación cargas persistente IAP-11.

Para esta nueva situación, cabe esperar que los resultados que se obtengan sean similares a los que se obtienen para la situación inicial, y de esta forma poder determinar si la línea de presiones asociada a esta nueva directriz, se ajusta dentro de la envolvente de los núcleos centrales. A diferencia de las situaciones anteriores analizadas, en este caso no se producirá ese aumento de los momentos flectores en los puntos cercanos a los extremos del arco, ocasionados porque los mismos, al considerarse fijos, no acompañan a la directriz.

Tabla 7. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 4 obtenida para la situación de análisis.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -14236 | -29796 | 0,477782 |
| 16 | -15352,5 | -27996,2 | 0,548379 |
| 15 | -8080,57 | -26428,9 | 0,305748 |
| 14 | -2597,37 | -25342 | 0,102493 |
| 13 | 1192,169 | -24624,7 | -0,04841 |
| 12 | 4169,428 | -24151 | -0,17264 |
| 11 | 7013,285 | -23845,2 | -0,29412 |
| 10 | 9462,011 | -23684 | -0,39951 |
| 1 | 10614,31 | -23679,7 | -0,44825 |
| 2 | 9462,011 | -23684 | -0,39951 |
| 3 | 7013,285 | -23845,2 | -0,29412 |
| 4 | 4169,428 | -24151 | -0,17264 |
| 5 | 1192,169 | -24624,7 | -0,04841 |
| 6 | -2597,37 | -25342 | 0,102493 |
| 7 | -8080,57 | -26428,9 | 0,305748 |
| 8 | -15352,5 | -27996,2 | 0,548379 |
| 9 | -14236 | -29796 | 0,477782 |

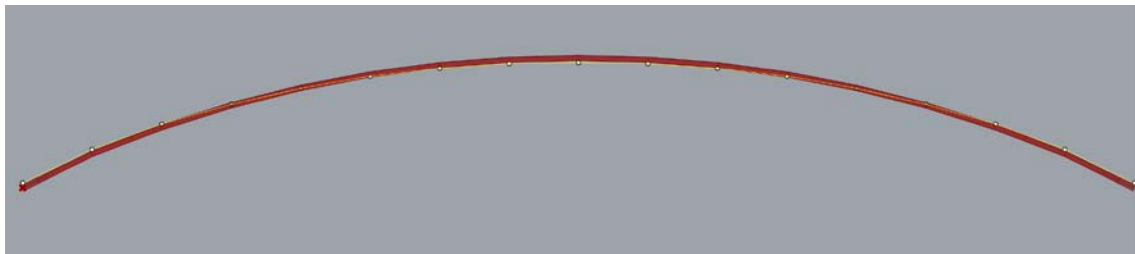


Figura 117. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 4.

El análisis de esta nueva directriz, proporciona resultados que se asemejan a los obtenidos para la directriz inicial; La línea de presiones obtenida, está más próxima, a la envolvente de los núcleos centrales en los extremos del arco; no obstante, en la parte central, se aleja en mayor medida que lo que se aleja la línea de presiones de la configuración inicial; Por lo tanto, la directriz más adecuada, con respecto al antifunicular de las cargas, es la directriz definida inicialmente. Es por ello, que, en el análisis de la línea de presiones, variando las secciones del arco y manteniendo la directriz fija, el cual se realizará posteriormente, se realizará con esta directriz. No obstante, antes de ello, con el fin de analizar la influencia en la variación de la línea de presiones en función de

la posición de los nudos rígidos, se analizará un nuevo caso variando las directrices empleadas con anterioridad.

6.2.2. ANÁLISIS CONSIDERANDO EXTREMOS DEL ARCO MÓVILES. VARIACIÓN DE LA POSICIÓN DEL NUDO RÍGIDO DE UNIÓN ENTRE LOS PIES INCLINADOS Y EL ARCO CON RESPECTO DE LA CONFIGURACIÓN INICIAL

Tal y como se ha señalado, se mantendrá fija la posición de los pies inclinados, pero, la posición del elemento nudo irá variando, de tal forma que la línea de presiones que se va obteniendo a partir del método iterativo, no se limita a los extremos, si no que, a partir de los nudos, la estructura la acompaña.

6.2.2.1. DIRECTRÍZ 2. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA DE LA DIRECTRÍZ 1 DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO

De la misma forma que se ha procedido anteriormente, se parte de la situación inicial de cálculo. Nuevamente, será necesario definir un modelo que recoja, como nueva directriz, la línea de presiones asociada a la directriz del arco inicial del puente, pero, en este caso, sin limitar la misma, a los extremos definidos.

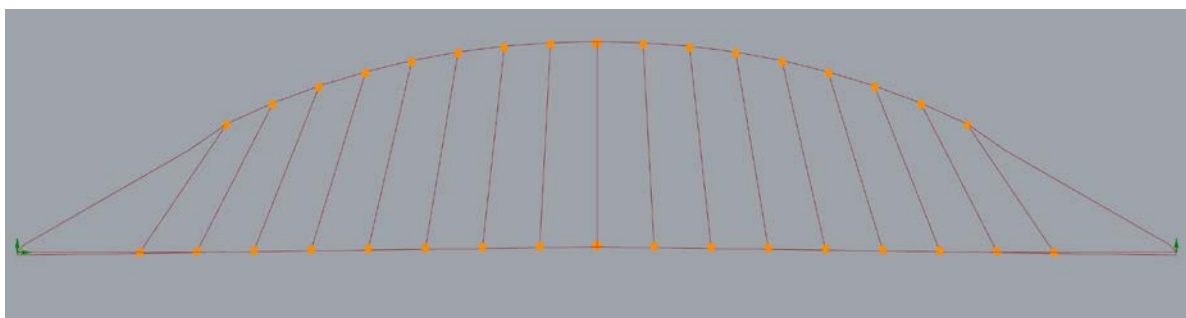


Figura 118. Modelo de cálculo generado asociado a la directriz 2. Adaptación de los nudos de enlace a dicha directriz.

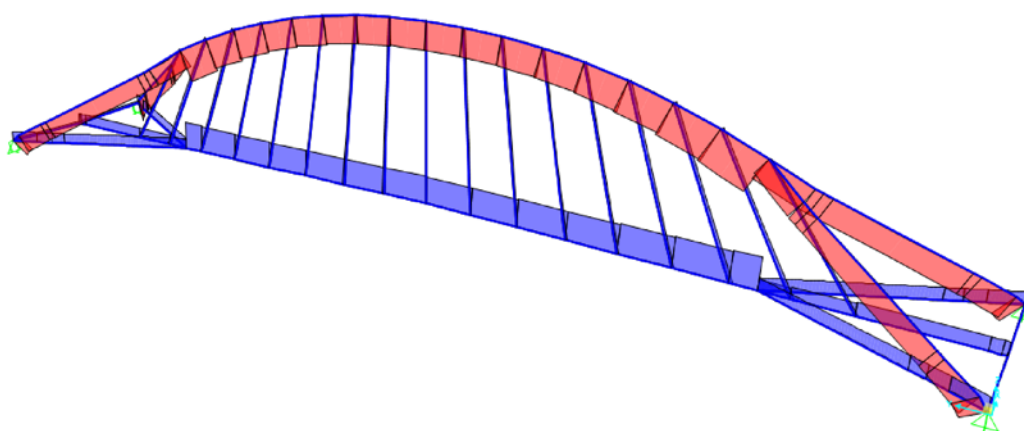


Figura 119. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 2 como directriz del arco. Variación nudo. Combinación cargas persistente IAP-11.

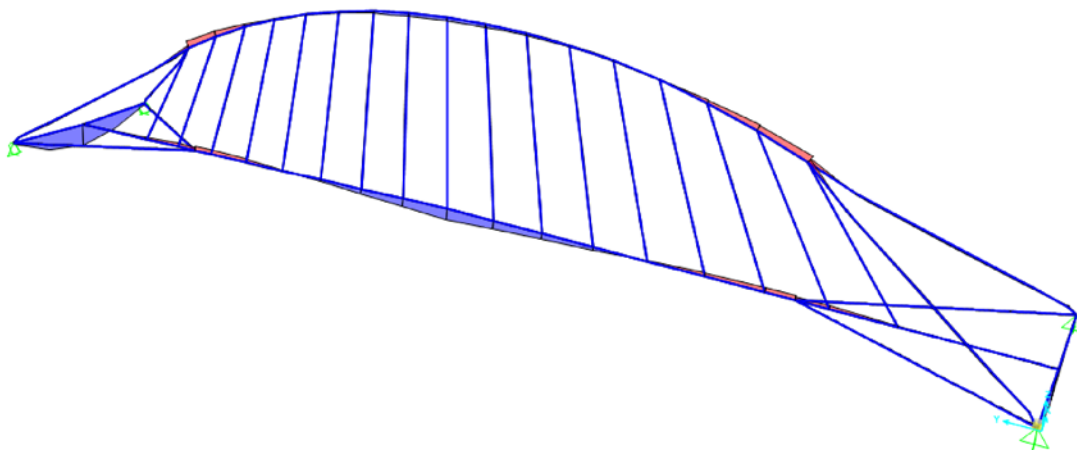


Figura 120. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 2 como directriz del arco. Variación nudo. Combinación cargas persistente IAP-11.

Tabla 8. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 4 obtenida para la situación de análisis.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -25428,1 | -30083,7 | 0,845246 |
| 16 | -17907,7 | -28137,6 | 0,636435 |
| 15 | -9113,97 | -26515,3 | 0,343725 |
| 14 | -2838,48 | -25430,5 | 0,111617 |
| 13 | 1207,225 | -24730,7 | -0,04881 |
| 12 | 4411,976 | -24274,2 | -0,18176 |
| 11 | 7646,816 | -23983,3 | -0,31884 |
| 10 | 10548,77 | -23832,4 | -0,44262 |
| 1 | 12067,66 | -23828 | -0,50645 |
| 2 | 10781,06 | -23831,8 | -0,45238 |
| 3 | 8029,811 | -23981,4 | -0,33484 |
| 4 | 4964,709 | -24271,4 | -0,20455 |
| 5 | 1908,541 | -24727,6 | -0,07718 |
| 6 | -1998,06 | -25426,9 | 0,078581 |
| 7 | -8089,22 | -26506,4 | 0,30518 |
| 8 | -16533,9 | -28106,5 | 0,588261 |
| 9 | -23371,6 | -29991,8 | 0,779266 |

Tal y como puede verse, al variar la posición de los nudos, se generan momentos flectores superiores en los extremos del arco, esto produce que, la línea de presiones en estos puntos, en los cuales, anteriormente al permanecer fijos, se

mantenían, se alejen considerablemente de la envolvente de los núcleos centrales. Supone un efecto similar al que se generaba en el caso anterior, al perder esa continuidad en la estructura que proporcionaba el conjunto pies inclinados, nudo de enlace y arco, en la situación de análisis inicial.

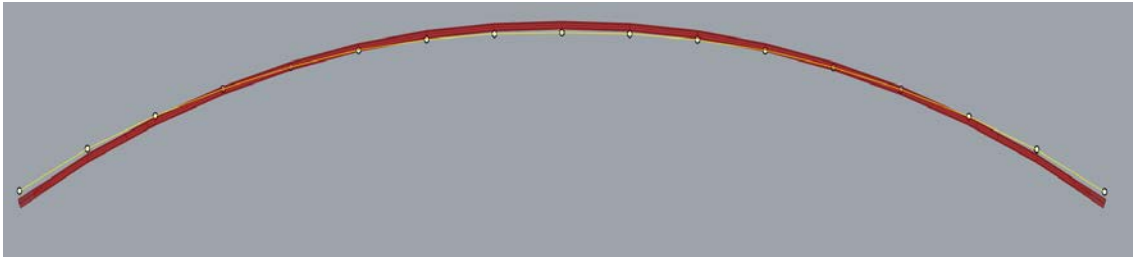


Figura 121. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 2. Variación de la posición del nudo.

6.2.2.2. DIRECTRÍZ 3. LÍNEA DE PRESIONES OBTENIDA DE LA DIRECTRÍZ 2 DE CÁLCULO DEL CASO DE ESTUDIO

Con el fin de seguir analizando el efecto que se produce, se continuará con el proceso iterativo, definiendo en este nuevo caso, como Directriz 3 de cálculo, la línea de presiones obtenida para la Directriz 2. Es necesario anunciar que, en base a los resultados obtenidos, en este caso se producirán momentos flectores, todavía superiores a los anteriores, en los extremos del arco, debido a la inclinación que se produce, tal y como puede verse en el modelo de cálculo generado, en los nudos de enlace entre los pies inclinados y el arco del puente.

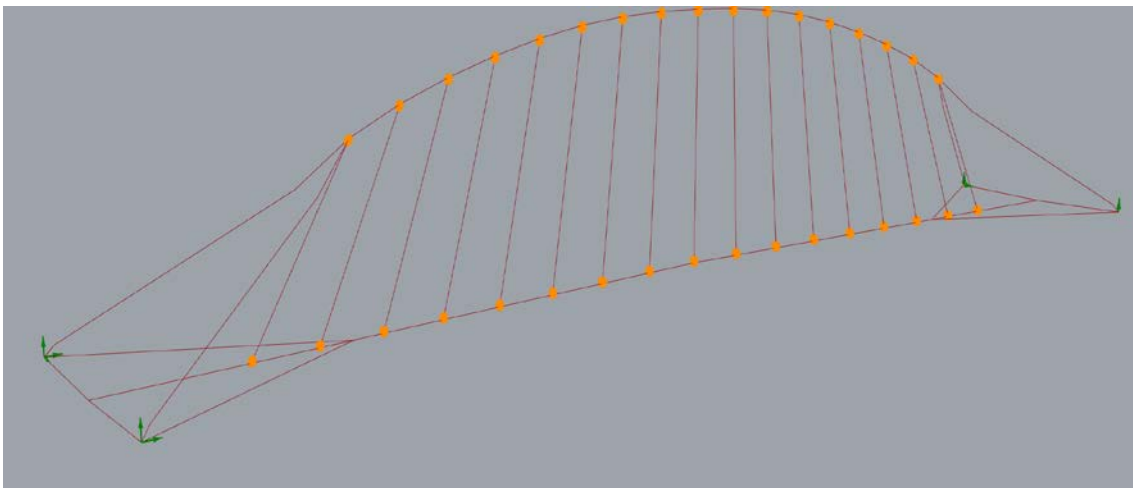


Figura 122. Modelo de cálculo generado asociado a la directriz 3. Adaptación de los nudos de enlace a dicha directriz.

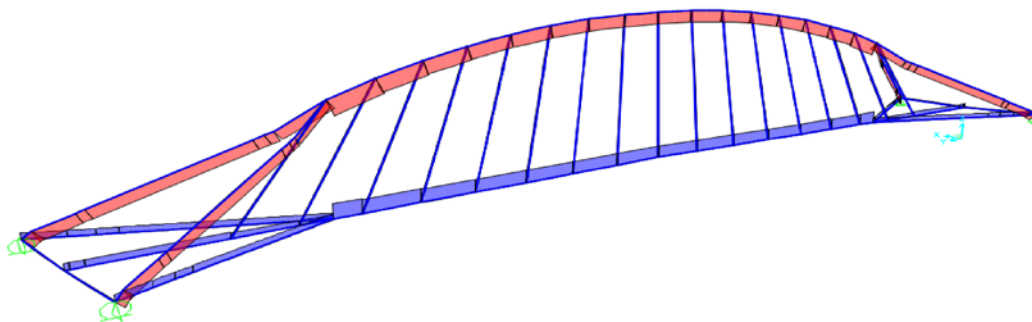


Figura 123. Esfuerzos axiales obtenidos empleando la directriz 3 como directriz del arco. Variación nudo. Combinación cargas persistente IAP-11.

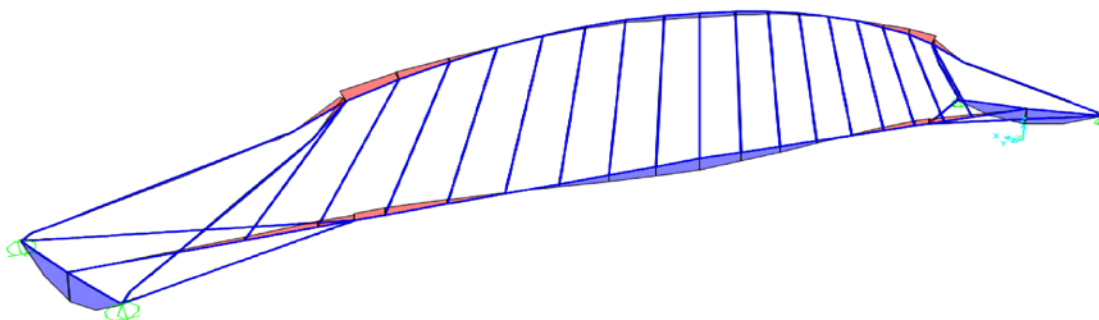


Figura 124. Momentos flectores obtenidos empleando la directriz 3 como directriz del arco. Variación nudo. Combinación cargas persistente IAP-11.

Tabla 9. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco. Excentricidad respecto de la directriz 4 obtenida para la situación de análisis

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -39328,8 | -30076,4 | 1,307631 |
| 16 | -25631,2 | -27792,8 | 0,922225 |
| 15 | -10822,7 | -26067,2 | 0,415185 |
| 14 | -1696,41 | -25077 | 0,067648 |
| 13 | 3018,791 | -24360,6 | -0,12392 |
| 12 | 6426,187 | -23950,4 | -0,26831 |
| 11 | 10388,1 | -23699,1 | -0,43833 |
| 10 | 14427,68 | -23578,4 | -0,6119 |
| 1 | 16544,6 | -23575,9 | -0,70176 |
| 2 | 14341,59 | -23577,5 | -0,60827 |
| 3 | 10289,42 | -23697,4 | -0,4342 |
| 4 | 6293,275 | -23948 | -0,26279 |
| 5 | 2862,528 | -24357,6 | -0,11752 |
| 6 | -1868,87 | -25004,1 | 0,074743 |
| 7 | -11078,4 | -26066,1 | 0,425013 |
| 8 | -26170,5 | -27797,9 | 0,941454 |
| 9 | -39328,8 | -30096 | 1,306778 |

Conforme a lo que se había mencionado, los momentos flectores que se producen en los extremos del arco, alcanzan valores muy elevados; teniendo en cuenta, que no existe una variación representativa del axil que se produce en las situaciones analizadas, se producen excentricidades demasiado elevadas, las cuales se alejan completamente de la envolvente de los núcleos centrales generada.

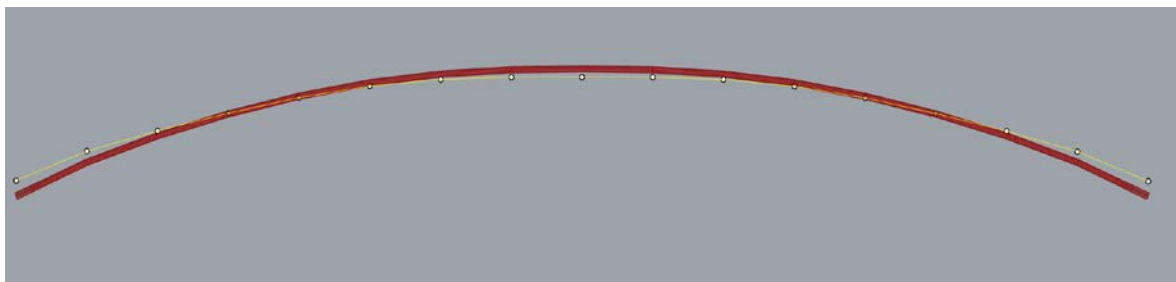


Figura 125. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 3. Variación de la posición del nudo.

Una vez concluido el estudio de la directriz del arco del puente del cual es objeto este análisis, resulta importante señalar que no se ha conseguido un ajuste mejor, para el antifunicular de las cargas, que el cual supone la configuración inicial. Para esa configuración, la línea de presiones se encontraba prácticamente en su totalidad, a excepción de los extremos y ligeramente en su parte central, dentro de la envolvente generada por los núcleos centrales. Cabe destacar, en relación a lo desarrollado al comienzo de este Capítulo, que puede no ser ventajoso que un arco de acero, se encuentre sometido totalmente a compresión, por lo cual, a diferencia del caso de hormigón, los efectos que generan las tracciones pueden resultar más beneficiosos. Independientemente de ello, con el fin de continuar analizando la variación de la línea de presiones en función de los condicionantes geométricos del puente y de las cargas aplicadas, se variarán las secciones del arco, dejando fija la directriz original, por configurar la que supone un mejor ajuste.

6.3. ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LAS SECCIONES DEL ARCO. SECCIÓN DE TABLERO Y DIRECTRÍZ DETERMINADAS

En este punto del análisis, se variará la relación canto-ancho de las distintas secciones que configuran el arco, definidas con anterioridad en el Capítulo 5.

Es importante señalar que, lógicamente, al aumentar el canto de la sección, el núcleo central de la misma aumentará, y por tanto, la envolvente aumentará su geometría; por lo que, bajo esa situación, se podrá ajustar en mayor grado la línea de presiones; no obstante, a pesar de que el efecto del viento no haya sido evaluado en el cálculo estructural, es importante señalar que al aumentar el canto de las secciones, existirá una mayor zona de exposición del arco frente al efecto del viento, lo cual podría desplazar transversalmente la línea de presiones

obtenida, dejándola, de esta forma, fuera de la envolvente generada. Por lo tanto, este fenómeno, se tiene en cuenta de cara al análisis que se realiza.

Tal y como se indicó al comienzo de este Capítulo, al variar la sección del arco, no es necesario generar un nuevo modelo de cálculo; por consiguiente, el modelo de cálculo generado empleando la directriz inicial será el cual será utilizado para realizar este análisis.

Finalmente, es importante señalar que, para configurar las secciones se mantendrán los espesores definidos en las secciones originales, en proporción a las variaciones que se realicen tanto del canto, como del ancho de las mismas.

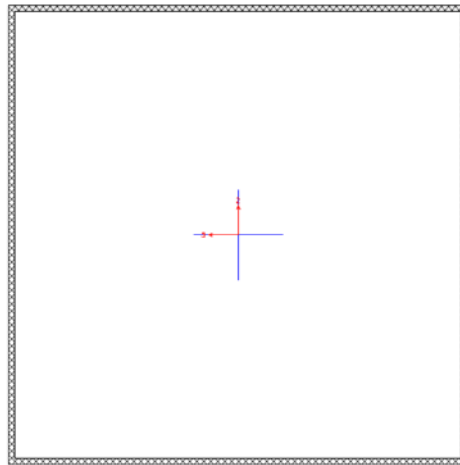


Figura 126. Sección Tipo arco 1. Ancho y canto variables según cada caso de estudio.

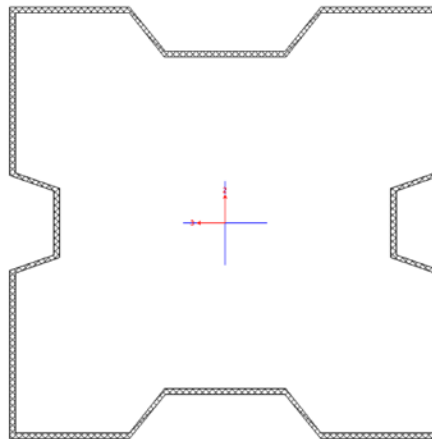


Figura 127. Sección Tipo arco 3. Ancho y canto variables según cada caso de estudio.

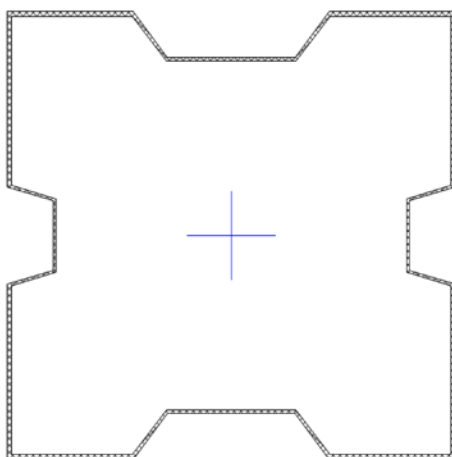


Figura 128. Sección Tipo arco 5. Ancho y canto variables según cada caso de estudio.

6.3.1. SECCIÓN ARCO 1. CANTO: 2,7 m, ANCHO: 2,7 m

Con el fin de aumentar el canto de la sección y lograr que la línea de presiones se ajuste a la envolvente de los núcleos centrales, se propone una relación en la que el ancho es igual que el canto en las distintas secciones que componen el arco. Nótese que, al aumentar las dimensiones de las secciones, el peso propio jugará un papel importante en el cálculo, aumentando los esfuerzos producidos por el mismo.

Tras definir las secciones transversales, nuevamente, en el programa de cálculo y tras realizar la asignación correspondiente a los distintos elementos que lo componen, se procede a realizar el cálculo estructural.

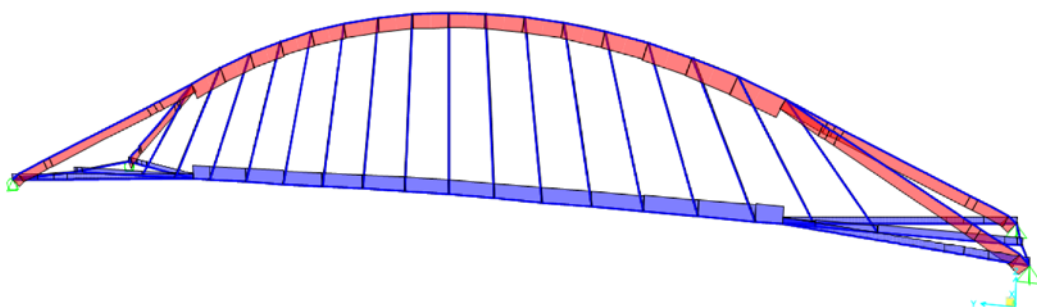


Figura 129. Esfuerzos axiales obtenidos para secciones del arco con Canto= 2,7 m y Ancho= 2,7m. Combinación cargas persistente IAP-11.

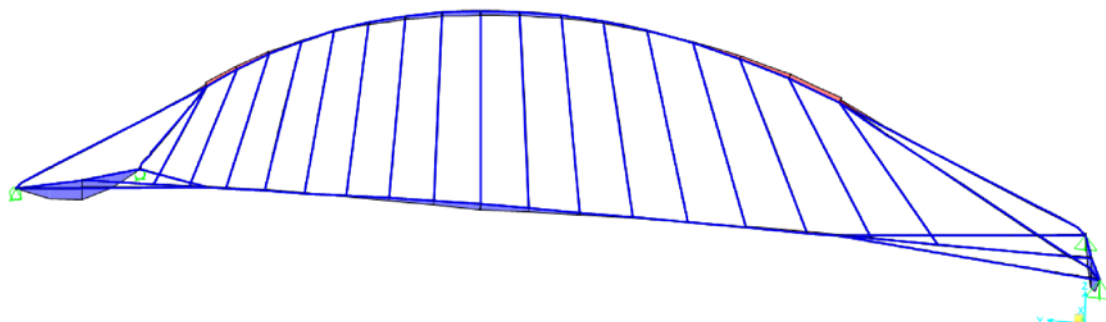


Figura 130. Momentos flectores obtenidos para secciones del arco con Canto= 2,7 m y Ancho= 2,7m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Tabla 9. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco para secciones del arco con Canto=2,7 m y Ancho= 2,7m. Excentricidad respecto de la directriz 1 obtenida para la situación de análisis.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -18254,6 | -29916,6 | 0,610182 |
| 16 | -14911,5 | -28410,9 | 0,524853 |
| 15 | -9280,8 | -27042,3 | 0,343196 |
| 14 | -3361,27 | -26015,2 | 0,129204 |
| 13 | 2225,759 | -25270,8 | -0,08808 |
| 12 | 7388,95 | -24740 | -0,29866 |
| 11 | 12023,49 | -24377 | -0,49323 |
| 10 | 15534,77 | -24178 | -0,64252 |
| 1 | 16989,08 | -24172,3 | -0,70283 |
| 2 | 15534,77 | -24178 | -0,64252 |
| 3 | 12023,49 | -24377 | -0,49323 |
| 4 | 7388,95 | -24740 | -0,29866 |
| 5 | 2225,759 | -25270,8 | -0,08808 |
| 6 | -3361,27 | -26015,2 | 0,129204 |
| 7 | -9280,8 | -27042,3 | 0,343196 |
| 8 | -14911,5 | -28410,9 | 0,524853 |
| 9 | -18254,6 | -29916,6 | 0,610182 |

En este caso, el canto de la sección del arco, se producen mayores momentos flectores, por lo tanto, esto genera mayores excentricidades en los nudos que lo conforman; no obstante, debido a la variación de la envolvente de los núcleos centrales, la línea de presiones se encuentra muy próxima a la misma; estando en su mayor parte, contenida por ella.

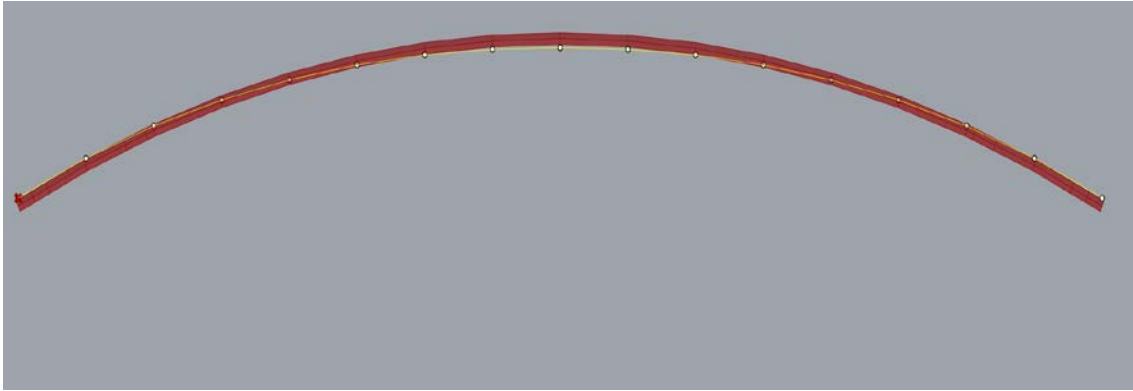


Figura 131. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 1. secciones del arco con Canto=2,7 m y Ancho= 2,7m.

6.3.2. SECCIÓN ARCO 2. CANTO: 3 m, Ancho: 2,7 m

Teniendo en cuenta que la línea de presiones anterior, se encontraba prácticamente contenida, a excepción de su parte central y ligeramente en los extremos, en la envolvente de los núcleos centrales, se analizará aumentar el canto a 3 metros, en lugar de 2,7 metros, con la finalidad de conseguir dicho ajuste.

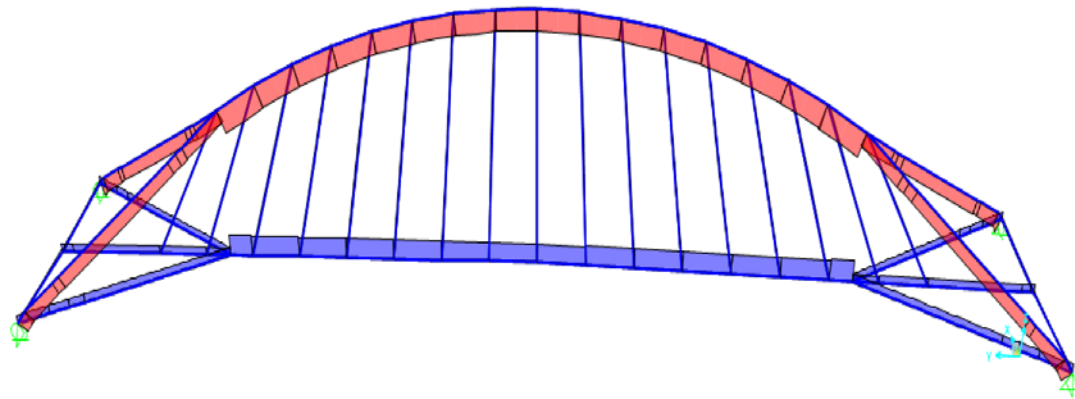


Figura 132. Esfuerzos axiales obtenidos para secciones del arco con Canto= 3 m y Ancho= 2,7m. Combinación cargas persistente IAP-11.

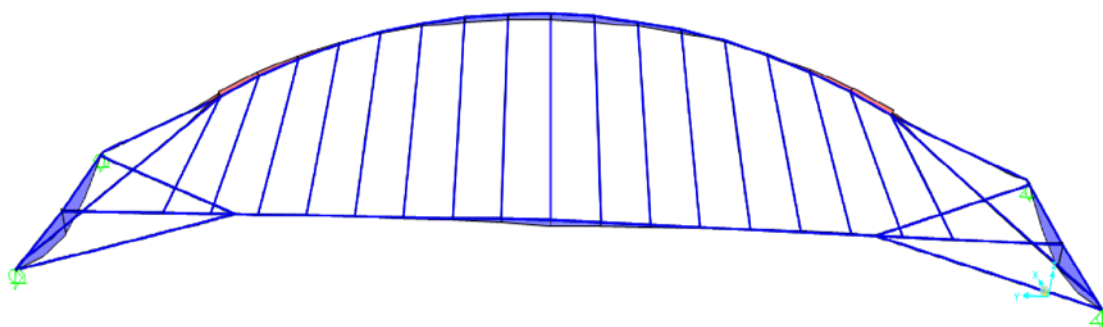


Figura 133. Momentos flectores obtenidos para secciones del arco con Canto= 3 m y Ancho= 2,7m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Tabla 10. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco para secciones del arco con Canto=3 m y Ancho= 2,7m. Excentricidad respecto de la directriz 1 obtenida para la situación de análisis.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -18843 | -30105,3 | 0,625902 |
| 16 | -15519,3 | -28653,1 | 0,541627 |
| 15 | -9610,66 | -27325,9 | 0,351705 |
| 14 | -3020,25 | -26314 | 0,114778 |
| 13 | 3524,171 | -25564,5 | -0,13785 |
| 12 | 9724,871 | -25017 | -0,38873 |
| 11 | 15280,14 | -24636,4 | -0,62023 |
| 10 | 19427,71 | -24426 | -0,79537 |
| 1 | 21110,96 | -24426 | -0,86428 |
| 2 | 19427,71 | -24426 | -0,79537 |
| 3 | 15280,14 | -24636,4 | -0,62023 |
| 4 | 9724,871 | -25017 | -0,38873 |
| 5 | 3524,171 | -25564,5 | -0,13785 |
| 6 | -3020,25 | -26314 | 0,114778 |
| 7 | -9610,66 | -27325,9 | 0,351705 |
| 8 | -15519,3 | -28653,1 | 0,541627 |
| 9 | -18843 | -30105,3 | 0,625902 |

En este caso, los resultados obtenidos consiguen ajustarse en mayor grado a la envolvente definida, ya que, se consigue ajustar la línea de presiones en los extremos de la misma; no obstante, al aumentar el canto, tal y como se ha descrito anteriormente, es posible que, dicha línea de presiones se vea desplazada transversalmente por el efecto del viento; por consiguiente, se propone emplear una nueva configuración, para el canto definido, aumentando el ancho de la sección.

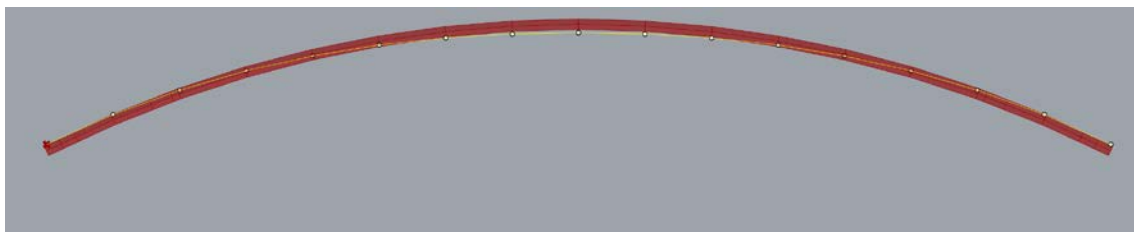


Figura 134. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 1. secciones del arco con Canto=3 m y Ancho= 2,7m.

6.3.3. SECCIÓN ARCO 3. CANTO: 3 m, Ancho: 3,5 m

Para asegurar que la línea de presiones definida en el punto anterior, no se desplace transversalmente por fenómenos de viento, se aumentará el ancho de las secciones del arco, con el fin de conseguir una nueva geometría del núcleo central de cada geometría, y, por consiguiente, de la envolvente de los mismos.

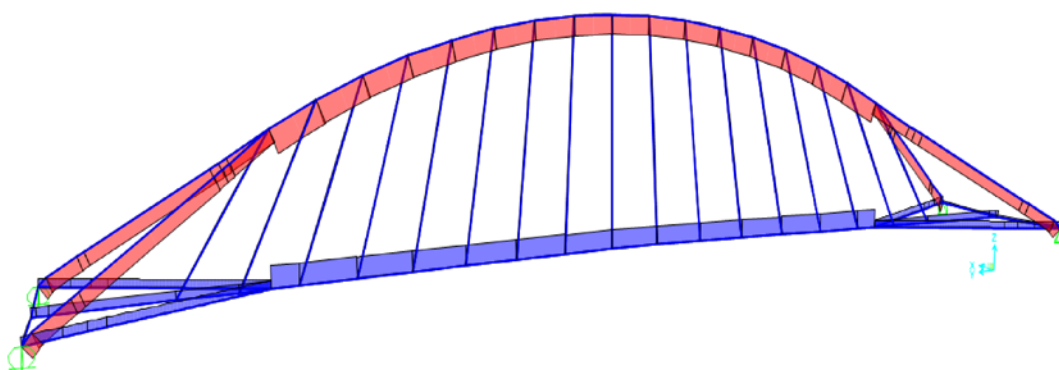


Figura 135. Esfuerzos axiales obtenidos para secciones del arco con Canto= 3 m y Ancho= 3,5 m. Combinación cargas persistente IAP-11.

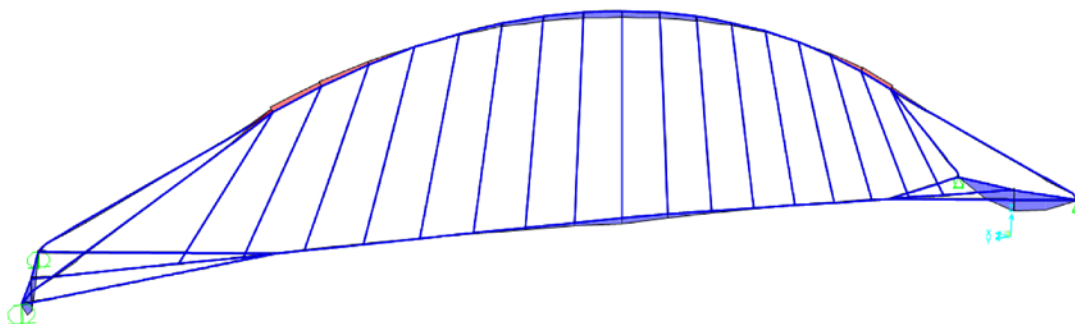


Figura 136. Momentos flectores obtenidos para secciones del arco con Canto= 3 m y Ancho= 3,5 m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Tabla 10. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco para secciones del arco con Canto=3 m y Ancho= 3,5 m. Excentricidad respecto de la directriz 1 obtenida para la situación de análisis.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -18918,2 | -30353 | 0,623274 |
| 16 | -15486,3 | -28908,1 | 0,535707 |
| 15 | -9504,32 | -27579,1 | 0,34462 |
| 14 | -2802,46 | -26570,5 | 0,105473 |
| 13 | 3957,13 | -25816,4 | -0,15328 |
| 12 | 10413 | -25262,4 | -0,41219 |
| 11 | 16202,18 | -24875,6 | -0,65133 |
| 10 | 20512,38 | -24661,5 | -0,83176 |
| 1 | 22000 | -24654,9 | -0,89232 |
| 2 | 20512,38 | -24661,5 | -0,83176 |
| 3 | 16202,18 | -24875,6 | -0,65133 |
| 4 | 10413 | -25262,4 | -0,41219 |
| 5 | 3957,13 | -25816,4 | -0,15328 |
| 6 | -2802,46 | -26570,5 | 0,105473 |
| 7 | -9504,32 | -27579,1 | 0,34462 |
| 8 | -15486,3 | -28908,1 | 0,535707 |
| 9 | -18918,2 | -30353 | 0,623274 |

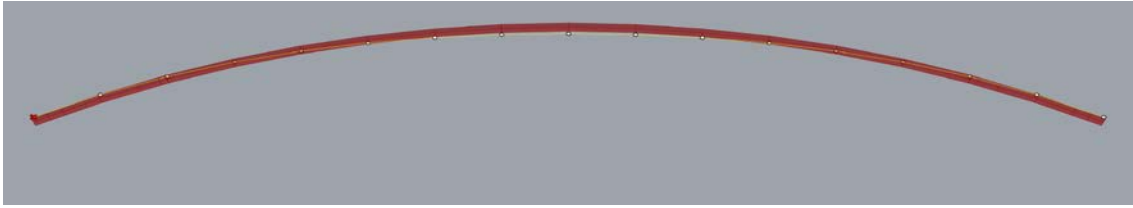


Figura 137. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 1. secciones del arco con Canto=3 m y Ancho= 3,5 m.

Para esta situación, se consigue ajustar completamente, excepto en su parte central, la línea de presiones; de tal forma que, se aumenta el ancho para asegurar que, por efectos de cargas transversales, dicha línea no se desplace.

Independientemente de ello, los resultados obtenidos de la ley de presiones y su ajuste, no justifican en ningún caso su ejecución, ya que supone una penalización importante con respecto a los efectos producidos por el peso propio y además, esta combinación penaliza la cuantía de material a emplear para la ejecución del arco. Es por ello que, sabiendo que la línea de presiones de la Directriz inicial supone un buen ajuste y encaja prácticamente en la envolvente de los núcleos centrales definida, se tratará de encontrar una configuración geométrica para las secciones del arco que, tras aumentar lo mínimo posible la relación entre el canto y el ancho de las mismas, consiga ajustar completamente la línea de presiones a la envolvente definida.

6.3.4. SECCIÓN ARCO 4. CANTO: 2 m, ANCHO: 3m

Con esta ligera variación geométrica, se conseguirá definitivamente encajar la línea de presiones a su envolvente de núcleos centrales correspondiente; de tal forma que se garantizará que el arco siempre se encuentre comprimido, sin sufrir las penalizaciones anteriores asociadas al peso propio, ni esa excesiva cuantía de acero a disponer. Cabe destacar que, otra configuración geométrica equivalente a disponer, de tal forma que se satisfagan las condiciones definidas, sería tratar de generar una sección que vaya tendiendo a una doble "T", la cual tendría un buen comportamiento frente al fenómeno analizado

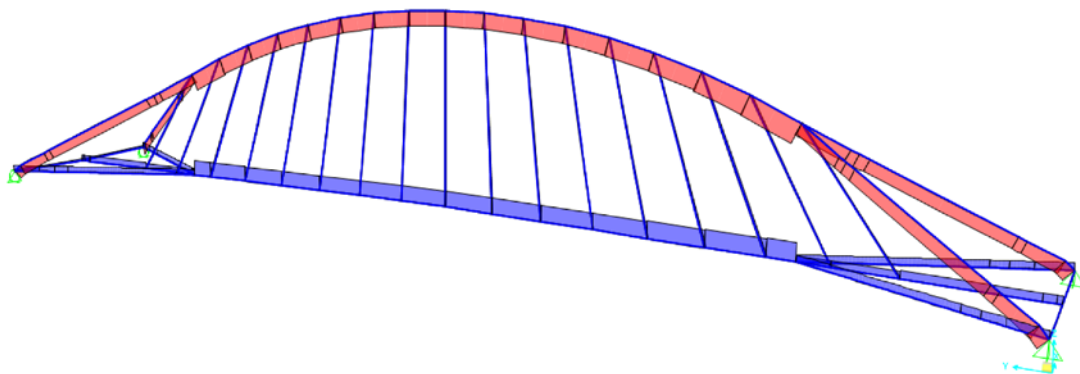


Figura 138. Esfuerzos axiales obtenidos para secciones del arco con Canto= 2 m y Ancho= 3 m. Combinación cargas persistente IAP-11.

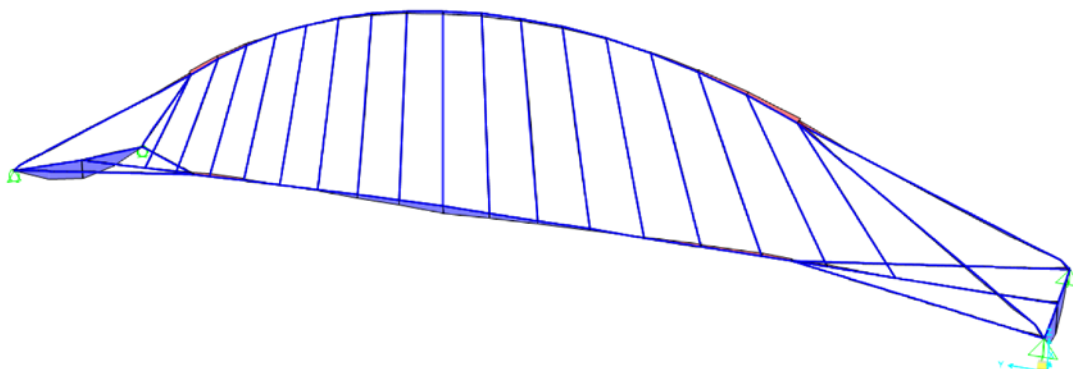


Figura 139. Momentos flectores obtenidos para secciones del arco con Canto= 2 m y Ancho= 3 m. Combinación cargas persistente IAP-11.

Tabla 11. Resultado de esfuerzos en los puntos que forman el arco para secciones del arco con Canto=2 m y Ancho= 3 m. Excentricidad respecto de la directriz 1 obtenida para la situación de análisis.

| NudoArco | M(kN.m) | N(kN) | e (m) |
|----------|----------|----------|----------|
| 17 | -16615,2 | -29844,1 | 0,556732 |
| 16 | -12905,2 | -28219,1 | 0,45732 |
| 15 | -7581,26 | -26758,5 | 0,283322 |
| 14 | -2776,33 | -25699,3 | 0,108032 |
| 13 | 1193,116 | -24964,8 | -0,04779 |
| 12 | 4633,436 | -24461 | -0,18942 |
| 11 | 7760,536 | -24125,8 | -0,32167 |
| 10 | 10234,12 | -23944,5 | -0,42741 |
| 1 | 11314,53 | -23939,2 | -0,47264 |
| 2 | 10234,12 | -23944,5 | -0,42741 |
| 3 | 7760,536 | -24125,8 | -0,32167 |
| 4 | 4633,436 | -24461 | -0,18942 |
| 5 | 1193,116 | -24964,8 | -0,04779 |
| 6 | -2776,33 | -25699,3 | 0,108032 |
| 7 | -7581,26 | -26758,5 | 0,283322 |
| 8 | -12905,2 | -28219,1 | 0,45732 |
| 9 | -16615,2 | -29844,1 | 0,556732 |

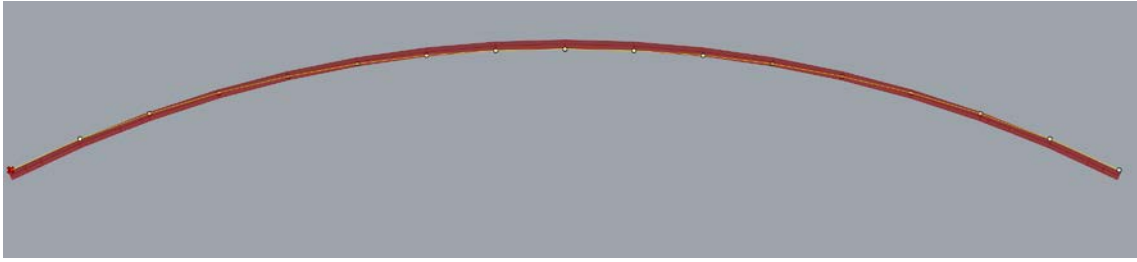


Figura 140. Representación de la línea de presiones asociada a la Directriz 1. secciones del arco con Canto=2 m y Ancho= 3 m.

De esta forma, a partir de la combinación de la directriz que supone el mejor ajuste de la línea de presiones, la cual es la directriz inicial, y una ligera modificación en las secciones del arco, es posible conseguir, para el estado de cargas actuante, una línea de presiones la cual garantice que el arco, siempre se encuentre en compresión. Se expresa nuevamente que, este análisis se ha realizado desde un punto de vista teórico, con el fin de analizar el comportamiento del arco y la variación de sus directrices con respecto a la generación de la línea de presiones, ya que, en algunos casos las compresiones en secciones demasiado esbeltas, pueden no ser beneficiosas para arcos metálicos.

CONCLUSIONES

Con independencia de que, muchos de los puntos siguientes han sido mencionados a lo largo de este trabajo fin de máster, es importante señalar los aspectos más relevantes que conforman las conclusiones obtenidas.

Sobre los puentes arco de tablero inferior

Los puentes arco con tablero inferior constituyen una solución en la que todo el arco se encuentra situado por encima del tablero; dicho tablero, se encuentra completamente suspendido del arco gracias al trabajo a tracción de las péndolas. Por otro lado, suponen una solución muy adecuada cuando el terreno de cimentación no es demasiado competente, ya que, al trabajar el tablero como un tirante, siempre a tracción, la componente horizontal que llega al terreno en la cimentación desaparece, existiendo únicamente componente vertical. Finalmente, el reparto de las cargas a través de sus elementos es muy intuitivo, con un arco trabajando a compresión y unas péndolas y un tablero trabajando a tracción. Además, gracias a la limpieza de los arcos, constituyen una solución muy valorada desde el punto de vista estético, con una integración completa en el medio.

Sobre las secciones del arco y los pies inclinados

Las secciones transversales que constituyen tanto el arco, como los pies inclinados, configuran una solución muy efectiva, ya que, gracias a los rehundidos que las caracterizan, se consigue suficiente inercia local para evitar la necesidad de disponer de cualquier tipo de rigidizador longitudinal interno.

Sobre la metodología BIM

Independientemente de que la ideología de la metodología BIM se basa en una correcta conexión entre las distintas bases de datos, es importante señalar que esa conexión, actualmente, no es tan automática como debiera ser. Esto da lugar a la necesidad de encontrar alternativas para transmitir la información de una herramienta computacional a otra y poder trabajar con ella de forma efectiva.

Sobre la modelización en AutoCAD 3D

Con independencia de la potencia que presenta desde el punto de vista gráfico, la modelización mediante AutoCAD 3D constituye una solución muy limitada, la cual presenta una gran rigidez y encorsetamiento para el usuario. La posibilidad de desarrollar modelos paramétricos, en los cuales la casuística de

combinaciones no tiene límites, deja claramente en desventaja al modelado mediante AutoCAD 3D.

Sobre la modelización paramétrica

A medida que se profundiza en la materia y el usuario se familiariza con el nuevo entorno, rápidamente se llega a la conclusión de que, esta metodología no tiene ningún tipo de limitación; la posibilidad de diseñar infinitas combinaciones de un elemento concreto y conectar todos los elementos entre sí para configurar un modelo, es una ventaja sin igual. Tal y como se ha comentado con anterioridad, las limitaciones existen en la ambición del propio usuario y en lo que éste pretenda modelizar. A su vez, la conexión con herramientas paramétricas de tipo estructural para su posterior análisis, ofrece un abanico de posibilidades muy grande, a través del cual, se modeliza una determinada estructura, con sus infinitas combinaciones asociadas y es posible transferir esas infinitas combinaciones a la herramienta de tipo estructural para su cálculo y análisis.

Sobre Karamba 3D

La posibilidad de realizar a partir de un modelo paramétrico, un modelo de cálculo estructural y su correspondiente análisis, tiene una ventaja muy grande. Tal y como se ha descrito en el punto anterior, con una correcta conexión con el modelo paramétrico podrán ser calculadas desde el punto de vista estructural todas las combinaciones geométricas de la estructura que deseen analizarse de una forma automática. No obstante, la limitación que ofrece Karamba 3D con respecto a las secciones transversales que es posible asignar a los elementos que componen la estructura ha hecho el proceso de cálculo mucho más laborioso. De esta forma, ha sido empleado como una herramienta para generar el modelo de cálculo, el cual posteriormente ha sido enviado, en un lenguaje común, a una herramienta de cálculo estructural.

Sobre SAP 2000

A pesar de no tener restricciones desde el punto de vista estructural, el proceso de definición de las secciones transversales y su asignación correspondiente a los distintos elementos que ponen la estructura, es poco automático; si además, se considera que, para cada modelo de cálculo que se le envía, es necesario realizar este proceso de nuevo, aparece una limitación adicional, en la cual, supone más tiempo el propio proceso de asignación y definición, que el propio cálculo y análisis estructural.

Sobre la búsqueda de la línea de presiones óptima

Tal y como se ha descrito en detalle en el Capítulo 6, la obtención de una directriz para la cual, para un estado de cargas determinado, su línea de presiones se encuentre alojada completamente en el interior de la envolvente de los núcleos centrales, con el fin de definir la directriz del arco que configure el antifunicular de las cargas, puede ser un proceso que requiera de muchas iteraciones y simulaciones para su definición. Su ajuste se basará fundamentalmente en la variación conjunta de las secciones transversales del arco que resistirán los esfuerzos debidos a las cargas actuantes y la forma de la directriz.

Con independencia de ello, tal y como se ha detallado anteriormente, en arcos metálicos no es tan importante que el arco se encuentre comprimido en su totalidad, a diferencia de arcos de hormigón en los cuales las tracciones pueden generar la fisuración del mismo, ya que las compresiones pueden dar lugar a inestabilidades y fenómenos de segundo orden más perjudiciales.

Sobre el caso de estudio

La situación de estudio ha supuesto una gran oportunidad a nivel personal; tanto porque implica salir de la zona de confort y afrontar una situación determinada desde el punto de vista profesional, así como por la posibilidad de acceder a información y material muy seleccionado para ahondar un poco más en el campo de la ingeniería estructural.

REFERENCIAS

- Ministerio de fomento, 2003. Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras, RPM-95. Dirección General de Carreteras.
- Payne, A.O. 2009. The Grasshopper Primer. Second Edition.
- Argüelles, R. y Arriaga, F, 2013. Estructuras de acero. Fundamentos y cálculo según CTE, EAE y EC3. Tomo 1.Tercera edición.